



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA



**VARIABILIDADE ESPACIAL DA COMPACTAÇÃO SUPERFICIAL E
SUBSUPERFICIAL DE UMA TOPOSSEQUÊNCIA SOB PASTAGEM**

THIAGO DE SOUZA RIBEIRO

AREIA - PB
ABRIL - 2012

THIAGO DE SOUZA RIBEIRO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA COMPACTAÇÃO SUPERFICIAL E
SUBSUPERFICIAL DE UMA TOPOSSEQUÊNCIA SOB PASTAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Mestre em Manejo de Solo e Água”. Área de concentração: Manejo e Conservação do Solo e Água.

Orientador: Prof. Ignácio Hernán Salcedo, PhD.

Ficha Catalográfica Elaborada na Seção de Processos Técnicos da
Biblioteca Setorial do CCA, UFPB, Campus II, Areia – PB.

R572v *Ribeiro, Thiago de Souza.*

Variabilidade espacial da compactação superficial e subsuperficial de uma topossequência sob
pastagem. / Thiago de Souza Ribeiro. - Areia: UFPB/CCA, 2012.

36 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade
Federal da Paraíba, Areia, 2012.

Bibliografia.

Orientador: Ignácio Hérnan Salcedo.

1. Solo – manejo 2. Solo – atributos físicos 3. Bacias hidrográficas
4. Geoestatística 5. Semivariograma I. Salcedo, Ignácio Hérnan (Orientador) II. Título.

UFPB/CCA

CDU: 631.4(043.3)

THIAGO DE SOUZA RIBEIRO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA COMPACTAÇÃO SUPERFICIAL E
SUBSUPERFICIAL DE UMA TOPOSSEQUÊNCIA SOB PASTAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Mestre em Manejo de Solo e Água”. Área de concentração: Manejo e Conservação do Solo e Água.

APROVADA EM: 12 /04/2012

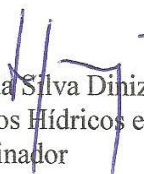
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Ignácio Hernán Salcedo, PhD.
DSER/CCA/UFPB
Presidente/Orientador



Prof. Flávio Pereira de Oliveira, Dr.
DSER/CCA/UFPB
Examinador



Laudízio da Silva Diniz, Dr.
Eng. Civil/CAGEPA/ Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Examinador

DEDICATÓRIA

Agradeço a Deus todos os dias por ter me guiado em minhas decisões e dado forças para vencer os obstáculos que a vida me impôs durante este período acadêmico e por iluminar-me em momentos de dúvidas e dificuldades.

Ao meu pai **Ricardo Aurélio de Andrade Ribeiro**, por toda atenção, dedicação, cuidado e ensinamentos que formaram a pessoa que sou hoje. A minha adorável mãe **Maria Aparecida de Souza Ribeiro**, a quem ofereço todo o meu amor, por sempre estar ao meu lado me incentivando, apoiando, oferecendo carinho e sábias palavras de conforto nos momentos mais críticos e, por suportar a dor da ausência, muito obrigado!

Ao meu querido irmão **Ricardo Aurélio de Andrade Ribeiro Júnior (Junim)**, pelo amor verdadeiro, amizade e que mesmo distante esteve sempre em meu coração.

Aos meus amados e inesquecíveis avôs **Agenor Ribeiro** e **Paulo Barros** e as minhas lindas avós **Maria do Carmo Ribeiro** e **Geralda Barros**, pela dedicação, atenção, amor e ensinamentos.

Aos meus tios **Gilson, Gilberto** (*in memoriam*) e **Luiz** por todo o carinho e as tias **Vera, Marta, Mércia, Lúcia Ribeiro, Valdelice, Socorro Andrade** que sempre me ajudaram e estiveram ao meu lado dando forças para continuar no caminho.

Aos meus primos **Denison e Daniele, Luciano e Lucélia, Netinho e Max** por sempre terem me apoiado nos momentos que mais precisei.

E a **Marina Matias e Livinha**, que terá sempre o maior e melhor dos sentimentos, os melhores momentos e toda a atenção guardados em meu coração.

“Nós preferimos acreditar, persistir e trabalhar muito.
Não é fácil, mas sempre possível.
Mais que isso, é gratificante vencer desafios,
encontrar saídas quando as portas estão fechadas,
cumprir metas e tornar o sonho em realidade.
Aprendemos, estamos crescendo e nos orgulhamos disso.
Sempre com humildade e nunca com arrogância”.

(Pedro Galhardi Neto)
Carpe diem.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (CCA/UFPB), por meio da Comissão do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, pela oportunidade de realização do curso;

Ao prof. Ignácio Hérnan Salcedo, pela orientação, paciência, críticas e sugestões sempre no momento oportuno, me auxiliando a vencer as barreiras e romper as dificuldades encontradas no decorrer do caminho.

Aos Prof. Flávio Pereira de Oliveira e Laudízio da Silva Diniz pelas contribuições na dissertação, buscando a melhoria do trabalho e da pesquisa.

Aos professores das disciplinas pelos ensinamentos valorosos, em especial: Nivaldo Timóteo (*in memorian*), Heloísa Helena, Ivandro de França, Maria Arlene de Araújo Farias.

Aos funcionários do Laboratório de Análises Física e Química do Solo e Planta, Suelene, Robeval e o Prof. Chico Ninha, Gilson Batista, Ednaldo Gerônimo e Marielza e as secretárias Cida e Rosa Cláudia.

À coordenação do curso de Agronomia: Secretário Arinaldo e ao coordenador Prof. Manoel Bandeira.

Ao Diretor Prof. Djail Santos.

A todos os funcionários do Prédio Central, Lacácia, aos funcionários da Biblioteca e a todos os funcionários da Limpeza.

Ao Coordenador do Restaurante Universitário: Assis.

Aos funcionários da reprografia: Paulo e Thiago.

Aos meus amigos de quarto: Severino do Ramo Nascimento dos Santos, Cosmo Rufino de Lima e João Tadeu de Lima Oliveira.

Aos amigos inesquecíveis: Abmael, Natan, O filho de seu Otto (Washington), Andinho, João Maria, os irmãos Herson e Heverson, Paulim, Kady, Jó, Daladier (boca), Nenen, Pedrinho e Sharly (*in memorian*).

Aos amigos de sempre: Severino, Tadeu, Cosmo, Renê, Luiz Leonardo, Doroteu, Cleiton, Gerlândio, Sabrina, Silvan, Edilberto, Dylamarck, Bruno Malaquias, Edson, Graça, Isaías, João Batista, Tamara, Cássio, Carlos Antônio, João Alberto, Luciano Raposo, Joel, Francisco Mesquita, Remí, Járisson, Marquinhos, Glêvia, Hallina, Micheli, Bala, Isnaldo, Jair, Paulo Assaré.

Considerando esta dissertação como resultado de uma caminhada que não começou na UFPB, agradecer pode não ser tarefa fácil, nem justa. Para não correr o risco da

injustiça, agradeço de antemão a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

Ao Prof. Walter Esfrain Pereira, por seus ensinamentos e todo apoio dado na realização da pesquisa;

A Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, a Profa. Vânia da Silva Fraga, e ao Prof. Guttemberg por todo seu empenho e dedicação em nossa formação;

Aos Docentes do Departamento de Solos e Engenharia Rural, por todos os ensinamentos e contribuições durante o período de formação;

Aos meus amigos de turma do mestrado pelos bons momentos de aprendizado e descontração: Anailson, João, Jhony, Manoel Euba, Walda, Renata, Emanuel, Augusto, Luiz Paulo, Cleiton, Dylamarck, Guttemberg, Tadeu Montenegro, Robinho, Elaine e Breno.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil, pela bolsa de incentivo ao estudo concedido;

A todos, sem exceção, muito obrigado!!!

Importa que me glorie? Na verdade não me convém. Conheço um homem em Cristo, desse homem eu me gloriarei, mas de mim mesmo não me gloriarei, a não ser das minhas fraquezas. Pois ainda que me quisesse gloriar, não seria insensato, porque diria a verdade. Mas abstenho-me: para que ninguém me tenha em conta de mais do que vê em mim ou ouve dizer de mim. Demais, para que a grandeza das revelações não me levasse ao orgulho, foi-me dado um espinho na carne para me esbofetear e me livrar do perigo da vaidade. Três vezes roguei ao Senhor que o apartasse de mim. Mas ele me disse: “Basta-te a minha graça, pois é na fraqueza que se revela totalmente a minha força”. Portanto, prefiro gloriar-me das minhas fraquezas, para que habite em mim a força de Cristo. Eis porque sinto alegria nas fraquezas, nas afrontas, nas necessidades, nas perseguições, no profundo desgosto sofrido por amor de Cristo. Por que quando me sinto fraco, então é que sou forte.

(II Coríntios, cap. 12, 1-2;5-10.)

SUMÁRIO

LISTA DE TABELA.....	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Microbacias Hidrográficas.....	3
2.2. Atributos Físicos como Indicadores de Qualidade do Solo.....	4
2.3. Compactação do Solo	5
2.4. Geoestatística	7
2.5. Variabilidade Espacial e o Manejo dos Solos.....	9
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1. Localização da Área de Estudo.....	11
3.2. Clima.....	12
3.3. Relevo e Solos	12
3.4. Levantamento Topográfico e Georeferenciamento	14
3.5. Caracterização Física do Solo.....	14
3.5.1. Resistência a Penetração	14
3.6. Análise Geoestatística.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1. Análise Variográfica.....	17
5. CONCLUSÕES	26
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
APÊNDICES	33

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Parâmetros matemáticos dos semivariogramas para valores de resistência a penetração do solo.....	19
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo de semivariograma (CAMARGO e FUKS, 2001).....	8
Figura 2. Localização da área de encosta na microbacia Vaca-Brava, PB (193820 – 193860 m E 9229320 – 9229160 m N de coordenadas planas)	11
Figura 3. Divisão climática do Estado da Paraíba segundo W. Köpper. (BARBOSA, 2006).	12
Figura 4. Relevo da área de encosta sob pastagem da microbacia Vaca-Brava.....	13
Figura 5. Mapa de solos da microbacia hidrográfica Vaca-Brava – Areia – PB (desenvolvido no CCA/UFPB – Areia - PB) (FARIAS, 2006).....	13
Figura 6. Distribuição das posições na toposequência (BREHM, 2010).....	14
Figura 7. Grade regular da área de encosta georreferenciada com distribuição dos pontos de leitura de compactação.	15
Figura 8. Semivariogramas ajustados para o atributo resistência à penetração nas profundidades de 0-10 cm (A), 11-20 cm (B) e 21-30 cm (C) em área de encosta.	20
Figura 9. Dispersão dos valores de desvios da resistência a penetração em relação à altitude da encosta.	21
Figura 10. Valores de frequência reais e estimados para a resistência à penetração do solo em área de encosta (A=0-10 cm – modelo esférico; B=11-20 cm – modelo exponencial e C=21-30 cm – modelo esférico).....	22
Figura 11. Mapas de distribuição espacial de resistência à penetração para as profundidades de 0-10 cm (A); 11-20 cm (B) e 21-30 cm (C) em área de encosta.	25

RESUMO

RIBEIRO, THIAGO DE SOUZA. **Variabilidade espacial da compactação superficial e subsuperficial de uma toposequência sob pastagem.** Areia-PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, Abril de 2012, 36p.il. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água. Orientador: Prof. PhD. Ignácio Hérnan Salcedo.

Os solos apresentam naturalmente variabilidade em seus atributos intrínsecos, estas variações são de suma importância em estudos de levantamento, caracterização física e planejamento experimental de áreas agrícolas. Desta forma, este trabalho objetivou avaliar a variabilidade espacial do grau de compactação do solo utilizando um penetrômetro automatizado numa toposequência sob pastagem. A pesquisa foi realizada em área de encosta com superfície de aproximadamente 2,0 ha na microbacia hidrográfica do açude Vaca – Brava, município de Areia – PB, em um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico. Para a geoestatística da resistência a penetração (RP) o solo foi amostrado em grade com malha regular em intervalos de 5,0, 10,0 e 20,0 m na mesma linha entre os pontos amostrais, perfazendo um total de 108 pontos até a profundidade de 30 cm, e posteriormente, estratificada em camadas de 0-10 cm; 11-20 cm e 21-30 cm. Para analisar a variabilidade espacial, utilizou-se a geoestatística, por meio da análise de semivariogramas, interpolação dos dados por krigagem e construção de mapas. A RP apresentou dependência espacial para todas as posições e profundidades analisadas podendo ser relacionadas com as variações das posições do relevo. As camadas de 0-10 e 21-30 cm foram ajustados ao modelo esférico com indicativo de dependência espacial moderado. A camada de 11-20 cm foi ajustado ao modelo exponencial com grau de dependência espacial fraco. Os maiores alcances para a RP foram verificados para as camadas de 0-10 e 21-30 cm, enquanto que na camada de 11-20 cm obteve-se o menor valor para o alcance demonstrando maior variabilidade e a menor continuidade espacial. Os maiores valores para a RP do solo foram encontrados no segmento do ombro (OMB) dentre todas as profundidades, identificando-se uma zona compactada neste segmento na camada mais superficial. Houve aumento da RP em profundidade em todas as posições da encosta na camada subsuperficial entre os perfis 0-10 cm até 11-20 cm. Na camada de 21-30 cm houve a maior continuidade para as menores faixas de compactação abrangendo, principalmente, os segmentos meia encosta (ME) e encosta inferior (EI).

Palavras – chave: Bacias hidrográficas; Geoestatística; Semivariograma; Atributos físicos; Resistência à penetração.

ABSTRACT

RIBEIRO, THIAGO DE SOUZA. Spatial variability of surface and subsurface compaction of a toposequence under grassland. Areia - PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, Areia, PB, April 2012, 36p. Thesis. Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água. Advisor: Prof. Ignacio Hernan Salcedo Ph.D.

Soils have naturally variability in their intrinsic aspects, these variations are very importance in survey studies, physical characterization and experimental design of agricultural areas. Thus, this study aimed to assess the degree of spatial variability of soil compaction on a grassland toposequence using an automated penetrometer. The study was conducted in a slope with an area of approximately 2.0 ha, located in the watershed Vaca Brava, Areia-PB, in Red Yellow Argisol.. For the geostatistical analysis of the penetrometer readings (PR), the soil was sampled in a grid with regular mesh at intervals of 5.0, 10.0 and 20.0 m in the same line between the sampling points, totaling 108 points to a depth of 30 cm. Results were stratified in layers of 0-10 cm, 11-20 cm and 21-30 cm. The spatial variability, was analyzed using geostatísticas, and kriging interpolation of the data for map construction. The PR showed spatial dependence for all positions and depths that were related to variations in relief positions. The 0-10 and 21-30 cm layers were adjusted to a spherical model with indications of moderate spatial dependence. The 11-20 cm layer was adjusted to the exponential model with a weak degree of spatial dependence. The higher ranges for PR were observed for the 0-10 and 21-30 cm layers, as in the layer of 11-20 cm gave the lowest value for the range showing greater variability and lower spatial continuity. The highest values for the PR soil were found in the shoulder (upper) segment of the slope at all depths, identifying a compacted zone in the superficial layer. There was an increase in the penetration resistance with depth in all positions of the slope in the subsurface layer between 0-10 cm and 11-20 cm.. In the 21-30 cm layer there was greater continuity of lower penetrometer readings mainly in the mid-slope and lower slope segments.

Keywords: Watersheds; Geostatistics; Semivariogram, Physical attributes, Penetration resistance.

1. INTRODUÇÃO

Os solos apresentam naturalmente variabilidade em seus atributos, sendo as práticas agrícolas fontes adicionais de heterogeneidade no solo, devido ao manejo exercido pelo homem das mais variadas formas (SOUZA et al., 1997; CAMARGO et al., 2010). Sendo assim, as informações destas variações são de suma importância em estudos de levantamento e caracterização física dos solos, para a atribuição de técnicas de amostragens adequadas e planejamento experimental de áreas agrícolas (CAVALCANTE et al., 2011).

A qualidade do solo é necessária para o crescimento e desenvolvimento de plantas, uma vez que ela pode ser estimada através das propriedades, atributos ou condições físicas do próprio solo que apresentam características físicas definidas uma vez que originam de rochas matrizes, fatores pedogenéticos, vegetação e topografia (REICHERT et al., 2003).

Dentre os atributos físicos do solo, a resistência do solo a penetração constitui uma das variáveis físicas a ser considerada na avaliação da qualidade do solo, sendo a compactação definida como uma ação mecânica à qual o solo é submetido, em que há uma redução em seus índices de vazios, que é a relação do volume de vazios pelo volume de solo (CUNHA et al., 2002; FIDALSKI et al., 2006).

A compactação afeta a estrutura do solo, tendo como consequência a reorganização das partículas do solo na camada superficial e subsuperficial, com isso dificultando as trocas gasosas, infiltração e o movimento de água no volume do solo, causadas pela diminuição na porosidade, o que ocasiona aumento da densidade do solo, afetando, por fim, a produtividade agrícola (MARASCA et al., 2011).

A avaliação do grau de compactação no campo é variável em relação ao volume de vazios pelo volume de sólidos, sendo realizada comparando a condição atual de uso do solo com o mesmo solo em uma condição natural, ou seja, em que não haja restrições para o crescimento e desenvolvimento de culturas. A compactação é muito frequente em áreas agrícolas que utilizam máquinas e implementos ou em áreas onde o pisoteio animal é intenso, e mesmo em áreas onde não há excesso de revolvimento do solo sofrem processos compactantes (CUNHA et al., 2002; NASCIMENTO et al., 2007; SILVA et al., 2004).

A compactação é fortemente dependente do teor de água presente nas camadas agricultáveis, e a participação do relevo é fundamental, pois exerce influência direta na quantidade de água infiltrada ao solo promovendo o transporte de sólidos, motivando progressivas transformações (morfológicas, físicas, químicas) e mineralógicas dos solos

formados, que se traduzem em diferentes tipos de solo em diferentes posições do relevo (CANELLAS et al., 2000; GHIDIN et al., 2006).

As formas de relevo exercem influências positivas e negativas sobre as principais propriedades do solo e também sobre os distintos trajetos do escoamento superficial pelo terreno. Este conhecimento é fundamental para o entendimento da variabilidade espacial dos atributos ocorrente nestas áreas, tendo a estruturação da paisagem ou a organização espacial de diferentes unidades de paisagens, impacto relevante na erosão e no estado de compactação do solo (CUNHA et al., 2005; SOUZA et al., 2003).

O discernimento das propriedades do solo no tempo e no espaço é tido como princípio primário para que se tenha um bom manejo das áreas agricultáveis (GREGO e VIEIRA, 2005). Desta forma, a variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser estudada pela geoestatística, que trata de um conjunto de técnicas aplicadas a variáveis regionalizadas, que definem a estrutura de dependência espacial de cada variável (VIEIRA et al., 1983).

Técnicas de amostragens georreferenciadas proporcionam um maior detalhamento sobre a variabilidade das propriedades físicas dos solos viabilizando o mapeamento e o zoneamento das variáveis existentes em uma área experimental. Vieira et al. (2002) atestam que a geoestatística é uma ferramenta que objetiva encontrar a variabilidade e a dependência espacial dos atributos elencados como forma de detalhamento e descrição do que ocorre com as propriedades físicas do solo. Segundo Grego e Vieira (2005), um maior detalhamento da área ocorre em função das distâncias atribuídas aos pontos de amostragem e são dependentes das propriedades a serem analisadas, assim também, como o tamanho da área a ser amostrada.

O uso de equipamentos como os penetrômetros para a avaliação do estado de compactação ocorre por ser considerado o melhor meio de estimar o impedimento mecânico ou não mecânico, despontando como um indicador mais sensível à compactação do solo que a densidade do solo (FREDDI et al., 2009)

O uso da variabilidade espacial das propriedades físicas, faz-se necessário em diversos campos da pesquisa agrônoma com importância relevante na caracterização e manejo do solo, sobretudo, em relação a profundidade que é um fator importante no estudo de dependência espacial da resistência a penetração do solo.

Desta forma, este trabalho teve por objetivo avaliar a variabilidade espacial do estado de compactação do solo utilizando um penetrômetro automatizado numa toposequência sob pastagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Microbacias Hidrográficas

A região semiárida do Nordeste Brasileiro, conhecida como Polígono da Seca, compreende uma área de 1.663.200 km² com uma população total de aproximadamente 24 milhões de habitantes, das quais 14 milhões vivem na área urbana e cerca de 10 milhões na área rural, sendo que a região se caracteriza por períodos de longas estiagens e as chuvas quando ocorrentes são de grandes intensidades, o que acabam gerando grandes enxurradas destrutivas que saem das bacias hidrográficas muito rapidamente e não conseguem recarregar os aquíferos (PADILHA et al., 2004).

As microbacias são consideradas unidades da paisagem mais básicas para estudar os processos hidrológicos e por existir fatores comuns quanto a gestão hidrológica (SILVA e CORRÊIA, 2007). Esta base de pensamento parte do princípio de que, caso haja, alterações nas condições naturais as mesmas sirvam de base para estudos dos ciclos hidrológicos e de uso da terra.

Neste sentido, a dinâmica da água no solo resulta de características internas do solo (textura, porosidade, profundidade do lençol freático, compactação, matéria orgânica, entre outros) e externas (precipitação, capacidade de suporte animal, cobertura do solo, tipo de relevo e densidade de plantas) (MUSY e SOUTTER, 1991).

O diagnóstico conservacionista para avaliar a deterioração ambiental deve ser a primeira fase na elaboração de um planejamento para uma bacia, sub-bacia ou microbacia hidrográfica (BARACUHY et al., 2003). Para Lima et al. (2002) o manejo sem planejamento das áreas agrícolas, e principalmente, aquelas que compreendem as bacias hidrográficas são as que estão mais propensas a sofrerem impactos ambientais, em se tratando de perdas de solo e consequentemente assoreamento dos cursos d'água.

O desenvolvimento de atividades agropecuárias na qual não há a manutenção dos recursos naturais renováveis em áreas de bacias hidrográficas irá refletir diretamente no regime hidrológico da mesma, portanto, a cobertura do solo feita pela vegetação transforma o regime de escoamento superficial em regime de escoamento subterrâneo através da interceptação direta das gotas das chuvas. Mosca (2003) ainda ressalta que o pastoreio das áreas deve ser elaborado de forma conveniente, devendo existir a rotatividade das áreas com o intuito de evitar a degradação das propriedades físico-hidrológicas do solo, conservando uma cobertura de gramíneas suficientemente desenvolvidas.

Áreas de microbacias quando bem manejadas garantem uma maior diversidade da flora e da fauna além de permitir viabilidade econômica e sustentável daqueles que fazem

uso dos recursos hídricos e de uso da terra. Portanto, o conhecimento sobre a compactação é um fator importante para o manejo adequado das condições físicas do solo a fim de melhorar a produção de água, em quantidade e qualidade, na escala de microbacia (MOSCA, 2003).

2.2. Atributos Físicos como Indicadores de Qualidade do Solo

A qualidade do solo refere-se à interação de processos no solo e propicia a estimativa das alterações de sua condição, decorrente de diversos fatores como uso da terra, padrões climáticos, sequências culturais e sistemas de manejo, esta qualidade, do ponto de vista físico, está associada àquele solo que permita a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, córregos e subsuperfície, respondente ao manejo e resistente à degradação permitindo as trocas gasosas e de calor com a atmosfera possibilitando o desenvolvimento de plantas (REICHERT et al., 2003).

Um dos meios de expressar a qualidade do ambiente edáfico pode ser via indicadores físicos do solo como densidade do solo, porosidade, formação de agregados, permeabilidade, textura e resistência à penetração de raízes, necessitando serem avaliados em função do tipo de uso, do manejo adotado, e mesmo, do suporte de capacidade animal (BERTOL, 2000; SILVA et al., 2008).

Os tipos de preparo do solo condicionam diferentes formas de compactação em profundidades aos solos em função do manejo atribuído. No plantio convencional, onde os solos são constantemente revolvidos, a compactação surge logo após a camada arável (aproximadamente 20 cm) devido ao tracionamento do tráfego de máquinas a pressão é repassada para as camadas mais profundas sendo denominada de “pé-de-arado” ou “pé-de-grade”, no caso do plantio direto, a camada de maior impedimento ao crescimento radicular fica “dentro” da própria camada arável entre 8 a 15 cm de profundidade, isto ocorre, devido à organização das partículas de solo onde não há revolvimento da camada arável (SUZUKI, 2005).

A compactação subsuperficial no preparo convencional e a compactação superficial no plantio direto são prejudiciais, mas no plantio direto as raízes ficam confinadas em um menor volume de solo do que no convencional, tornando-as mais susceptíveis às variações climáticas e dependentes de água e nutrientes nesse menor volume de solo (SILVA, 2003).

O teor de água do solo exerce forte influência sobre a aeração, a temperatura e o impedimento mecânico, os quais são afetados pela densidade do solo e a distribuição do

tamanho de poros (REICHERT et al., 2003). A compactação uma vez presente nos solos resulta em redução de macroporos e aumento da densidade, o que, em solos secos, reflete em maior resistência física e decréscimo no potencial de água, e, em solos úmidos, ocorre comportamento diferente, gerando a falta de oxigênio (MÜLLER et al., 2001).

A compactação é um processo de densificação resultantes de cargas aplicadas na superfície dos solos e estar relacionada à densidade e porosidade do solo, de modo que, o aumento da primeira reduz substancialmente a macroporosidade responsável pela aeração e infiltração da água, e aumenta a microporosidade, este último responsável pela retenção da água no solo (SILVA et al., 2000). Beutler et al. (2006) ressaltam que os poros maiores são menos resistentes e deformam-se formando os poros menores que são mais resistentes e suportam maiores pressões.

Uma das formas de qualidade do solo é a sua estruturação que se altera com o tipo de manejo adotado aos solos e as culturas, sendo que a utilização de espécies de cobertura, capazes de romper camadas compactadas, assume um papel importante, pois as plantas podem proporcionar rompimento mais uniforme da camada compactada, além de contribuírem para a melhoria do estado de agregação do solo (GONÇALVES et al., 2006). Roth et al. (1991) observaram que a compactação dos agregados na camada de 0-10 cm, no preparo convencional e plantio direto, reduziu principalmente os macroporos, enquanto os meso e os microporos dos agregados foram semelhantes aos da mata natural.

Rocha e Kurts (2001) comentam que, de acordo com os diagnósticos são elaborados prognósticos que são indicadores para a melhoria do ambiente edáfico, no entanto, recomenda-se começar a recuperar a ambiência adotando-se, como unidade básica, as bacias hidrográficas, as quais, subdivididas em sub-bacias e microbacias, têm mostrado grande eficiência em trabalhos de campo.

Portanto, a forma de exploração das terras promove modificações nas propriedades do solo e a magnitude desse efeito reflete-se nos principais atributos físicos dos solos elevando-os a níveis indesejáveis para a manutenção da qualidade do solo. Sendo assim, esta manutenção com base nas propriedades físicas torna-se essencial para o desenvolvimento agrícola, porém revela-se enfraquecido caso o sistema adotado seja o de intensa exploração.

2.3. Compactação do Solo

Na agricultura moderna a compactação atinge uma área estimada em 68 milhões de hectares no mundo, e pode ser descrita em termos da tensão aplicada ao solo e as

mudanças resultantes nas condições do mesmo, sendo que sua quantificação tem sido empregada através das leituras de resistência a penetração (RP) por demonstrar melhores correlações com o manejo do solo, produtividade das plantas, porosidade, densidade do solo e, principalmente, conteúdo de água (BEUTLER et al., 2006).

A qualidade estrutural dos solos tem sido comumente analisada por parâmetros como a compactação, densidade e a porosidade, todas relacionadas diretamente em um mesmo tipo de solo (DALBIANCO, 2009). Solos com camadas compactadas apresentam redução da porosidade total e da macroporosidade, e aumento da microporosidade e densidade dos solos (KLEIN e LIBARDI, 2002). Nesses casos, o aumento da microporosidade aumentaria a retenção de água no solo, porém comprometeria a dinâmica da água e a difusão de gases (OLIVEIRA et al., 2004).

O manejo do solo assume relevada importância quando se trata da predisposição a compactação, uma vez que este pode ser resultado de condições de manejo do solo inadequado, seja pelo uso excessivo de máquinas ou pelo excesso de pisoteio animal, e que acaba sendo intensificado em terrenos de maior declividade e quando há presença de pouca matéria vegetal na superfície do solo (MIGUEL et al., 2009).

A dinâmica da água no solo também é uma característica que se modifica de acordo com o uso do solo por ser dependente de fatores como porosidade total, compactação, cobertura vegetal, relevo, dentre outros, que podem reduzir a permeabilidade ocasionando elevação do escoamento superficial e perda de solo por erosão hídrica (SOUZA e ALVES, 2003).

Um dos parâmetros padrões para leituras de RP no campo tem sido o conteúdo de água na capacidade de campo, sendo um ponto de referência para estabelecer um zoneamento da compactação do solo (BENGOUGH et al., 2001). Além disso, a formação de camadas compactadas superficial e subsuperficialmente tem sido a principal limitação a infiltração de água no solo promovendo déficits hídricos e nutricionais as plantas, constituindo-se numa restrição ao aprofundamento radicular e causa primária da erosão (GONÇALVES et al., 2006).

Segundo Roboredo et al. (2010) a RP é bastante influenciada pelo teor de água no solo, onde pode-se notar um aumento exponencial com a diminuição da umidade, e que isto ocorre em razão do aumento das forças de coesão entre as partículas do solo e a redução do efeito lubrificante da água sobre as mesmas.

Nas microbacias hidrográficas, a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo é fundamental para a caracterização do comportamento espacial do solo e tem sido

objeto de alguns estudos nos últimos anos, contribuindo para o estabelecimento da melhor maneira para a atribuição de formas de manejo sustentável do solo (VIEIRA, 1998).

A análise da variabilidade espacial da RP parte do uso de ferramentas como a geoestatística que permitem o conhecimento da estrutura espacial e temporal dessa variável, bem como estimar os valores de variáveis correlacionadas, podendo ser usadas para dimensionar ou redimensionar o planejamento do manejo das áreas agrícolas, como por exemplo, modificando o hábito temporal de pastejo dos animais nas áreas (MIGUEL et al., 2009).

Portanto, a modificação do ambiente edáfico aliado ao manejo inadequado em que há mobilização intensa do solo ocasiona uma desagregação do solo, e quando há essa desagregação a erosão hídrica é favorecida, principalmente, quando há exposição de solo à ação das gotas de chuva contribuindo para que em áreas declivosas haja transporte de sedimentos em diferentes escalas (DALBIANCO, 2009).

2.4. Geoestatística

Em ciência do solo, a maior parte das propriedades do solo possui dependência espacial, isso significa que os valores assumidos por uma determinada variável numa determinada posição definida na área de estudo, varia de acordo com a direção e a distância de separação entre as amostras vizinhas (PANOSSO, 2006).

Na análise estatística, alguns métodos supõem que a realização das variáveis aleatórias são independentes entre si, ou seja, que os vizinhos não exercem influências umas sobre as outras, mas em relação a fenômenos naturais há uma certa estruturação nas variações entre vizinhos, deste modo pode-se dizer que variações não são aleatórias e, portanto, apresentam algum grau de dependência espacial (GUIMARÃES, 2004).

Pesando desta maneira em, 1951, Daniel G. Krige percebeu que não poderia encontrar relação entre as amostras na concentração de ouro sem levar em consideração as distâncias entre as observações, sendo os fundamentos matemáticos aprimorados, mais adiante, por G. Matheron (1963) que desenvolveu a “Teoria das variáveis regionalizadas” (PANOSSO, 2006). A partir daí, a aplicação das técnicas da geoestatística expandiu-se para diversas áreas da ciência da terra (hidrologia, mineração, petróleo, agricultura, meteorologia, florestas, ambiente), servindo como uma ferramenta de tomada de decisões e possibilitando melhoria na caracterização e entendimento de certos fenômenos (AZEVEDO, 2004).

A geoestatística é uma ferramenta de análise constituída por um conjunto de elementos técnicos que permite a identificação da variabilidade e distribuição espacial determinando a formação estrutural da dependência espacial detalhada das propriedades do solo (VIEIRA, 2000).

As análises dos dados espaciais pela geoestatística são elaboradas pela incorporação de coordenadas geográficas a um conjunto de dados e métodos de interpolação gerando uma superfície contínua que são expressos em mapas temáticos (SÁNCHEZ, 2006).

O ajuste teórico dos dados analisados a modelos matemáticos denomina-se semivariograma, que é um dos aspectos mais importantes da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas (DALBIANCO, 2009). O semivariograma é representado por três parâmetros: o patamar, o efeito pepita e o alcance. Quando o semivariograma tende a estabilizar-se a uma constante, este limite é denominado de patamar (C_1), que pode se aproximar de forma assintótica ou atingir o patamar numa determinada distância. O efeito pepita (C_0) é definido como a descontinuidade do semivariograma na origem e é utilizado para explicar a variação do atributo para distâncias menores que a considerada na grade de amostragem e erros de medição. O alcance (a) determina a região espacial até onde a variável estar correlacionada espacialmente e pode variar com a direção. A contribuição (C_1) é a diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0) (Figura 1) (VALENCIA, 2004).

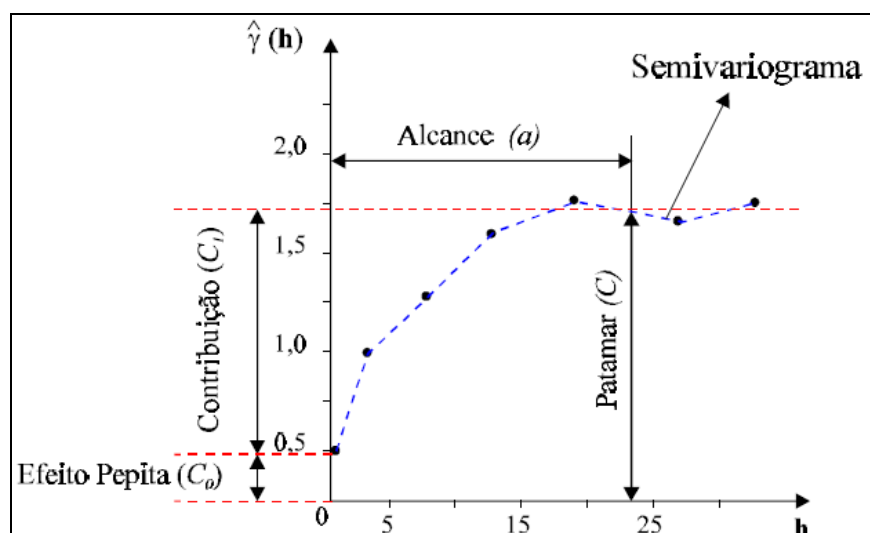


Figura 1. Exemplo de semivariograma (CAMARGO e FUKS, 2001).

Na interpolação é utilizado um modelo de semivariograma que melhor descreve a variabilidade dos dados amostrais, sendo importante que o modelo de ajuste represente bem a tendência da semivariância em relação à distância (SÁNCHEZ, 2006).

Um dos métodos de interpolação, para estimação de dados em locais não amostrados, mais usados nas técnicas geoestatísticas é a Krigagem, termo derivado de D. G. Krige, este método destaca-se por ser considerado não tendencioso e mais eficiente o que diferencia dos demais métodos, pois durante a estimação é atribuído pesos diferentes entre as amostras devido à vizinhança ser considerada no procedimento inferencial. Este interpolador considera, ainda, o número de amostras utilizadas, as posições das amostras, a zona a ser estimada e a continuidade espacial da variável em estudo (AZEVEDO, 2004).

Portanto, a geoestatística é uma ferramenta importante para a análise de dados no âmbito da agricultura, sendo usada no planejamento, análise da continuidade espacial e na elaboração visual através da geração de mapas temáticos dos atributos do solo (VALENCIA, 2004).

2.5. Variabilidade Espacial e o Manejo dos Solos

A geoestatística consiste em um conjunto de métodos estatísticos elaborados para analisar um atributo de um fenômeno que tem distribuição contínua sobre uma área geográfica (MACHADO et al., 2004). Um atributo do solo é considerado como uma variável com continuidade espacial, sendo que este mesmo pode apresentar variações distintas em superfície e em profundidade (PARKIN, 1993; CETIN e KIRDA, 2003).

O solo é o resultado da ação e interação de vários fatores de formação, sendo que seus fenômenos seguem leis naturais que conferem continuidade espacial a algumas de suas características, dessa forma, a continuidade espacial expressa à forma como um atributo de um solo varia com a distância e a direção (MACHADO et al., 2004).

Sánchez (2006) ressalta que as aplicações técnicas de geoestatística vêm tornando-se uma ferramenta muito eficiente na relação solo e ambiente, buscando a adequação das práticas de manejo na otimização da produtividade agropecuária e minimização dos impactos ambientais, mas isso acontece a partir da inserção de um conjunto de dados amostrais somados ao uso de métodos de interpolação para gerar superfícies contínuas dispostos em mapas digitais permitindo a compreensão mais aprofundada a respeito das variabilidades espaciais dos atributos do solo.

A variabilidade espacial dos solos é resultado de processos pedogenéticos e pode ser dividida em aleatória e sistemática. A primeira ocorre a partir da interferência de

fatores dos quais a sua causa é imprecisa, o que não acontece com a sistemática que ocorre em função da forma do relevo, disposição da topossequência, fatores de formação do solo, etc, que são considerados de precisão por atuarem numa escala espacial com temporalidade e, dessa forma, a variabilidade sistemática pode ser modelada pela geoestatística (AZEVEDO, 2004).

Trangmar et al. (1985) e Thanachit et al. (2006) ressaltam que a heterogeneidade espacial é resultado dos fatores pedogenéticos intrínsecos, mas outros estudos têm demonstrado também sua relação com a topografia do terreno. Assim, uma área em condição natural ou cultivada apresentará de acordo com o uso e manejo do solo e suas propriedades físicas, químicas e biológicas, maior ou menor heterogeneidade, podendo sua variabilidade ser alta ou baixa (FORSYTHE, 1970).

Atualmente são desenvolvidas muitas pesquisas sobre o estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo (CAVALCANTE et al., 2011; MARASCA et al., 2011; FIDALSKI et al., 2006; LIMA et al., 2008; SOUZA et al., 2003 e SOUZA et al., 2001), e todos fazem uso da geoestatística para modelar padrões espaciais com o intuito de obter melhores avaliações dos fenômenos.

Souza et al. (2003) observaram que mesmo após 30 anos de cultivo de cana-de-açúcar o manejo do solo não ocasionou variabilidade aos atributos físicos do solo na mesma magnitude do relevo.

Cavalcante et al. (2011) analisando a variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos concluíram que as formas e usos de manejo empregadas induziram em ordem crescente, plantio direto, preparo convencional e pastagem à degradação dos atributos físicos do solo, em relação ao cerrado. Abreu et al. (2003) analisando a variabilidade espacial da resistência a penetração em diferentes profundidades, inferiram que a compactação do solo causada pelo efeito acumulativo das pressões nos mais de 10 anos de plantio direto tenha diminuído sensivelmente a variabilidade espacial na subsuperfície, predominando a variabilidade aleatória.

Por fim, Castrignano et al. (2000) esclarecem que a variabilidade do solo precisa ser entendida como uma análise mais detalhada das propriedades do solo, uma vez que os diversos fatores que refletem na sua variabilidade refletem no manejo, na penetração das raízes e no transporte de ar e água, dentre outros fatores.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da Área de Estudo

A pesquisa foi realizada na microbacia hidrográfica do açude Vaca-Brava, localizada na mesorregião do Agreste, microrregião do Brejo paraibano, Nordeste do Brasil, compreendida entre as coordenadas planas Universal Transverse Mercator (UTM) 192500 – 196000 m E e 92230500 – 9227000 m N (GALVÃO et al., 2005; SANTOS et al., 2009). Possui uma área de 1.500 ha, com altitude média de 637 m. Selecionou-se uma área de encosta sob cultivo de pastagem pertencente a Fazenda Riachão que fica a margem da rodovia PB 079 entre os municípios de Areia e Remígio, com área de aproximadamente 2,0 ha (193820 – 193860 m E e 9229320 – 9229160 m N de coordenadas planas) (Figura 2).

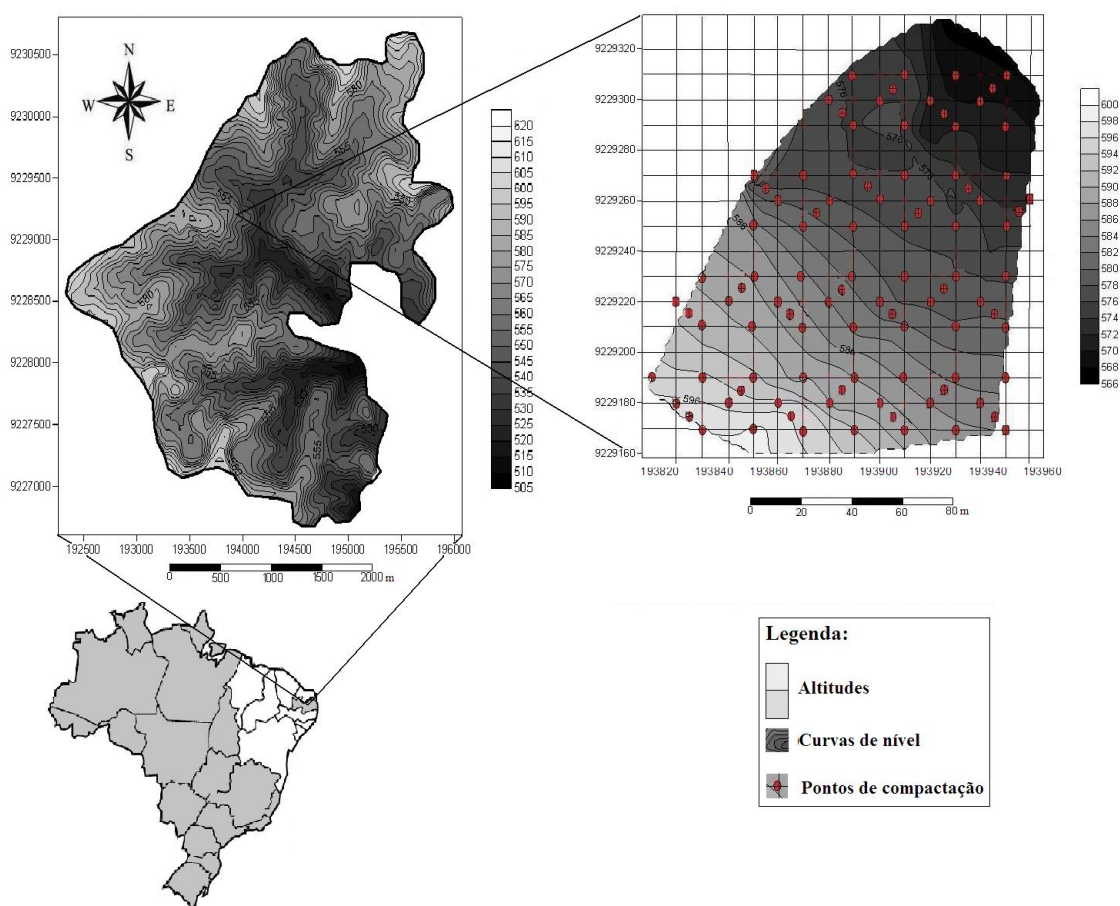


Figura 2. Localização da área de encosta na microbacia Vaca-Brava, PB (193820 – 193860 m E e 9229320 – 9229160 m N de coordenadas planas).

3.2. Clima

Segundo a classificação de Köppen, predomina o clima do tipo As', que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, estação seca podendo atingir entre cinco e seis meses, pluviosidade média anual entre 900 e 1.400 mm, concentradas nos meses de março a agosto e com período seco entre setembro e fevereiro. No mês junho de 2011 durante a aplicação do estudo a temperatura média foi de 20,8 °C; precipitação média de 6 mm e umidade relativa do ar de 84 % (Figura 3) (SANTOS et al., 2002).

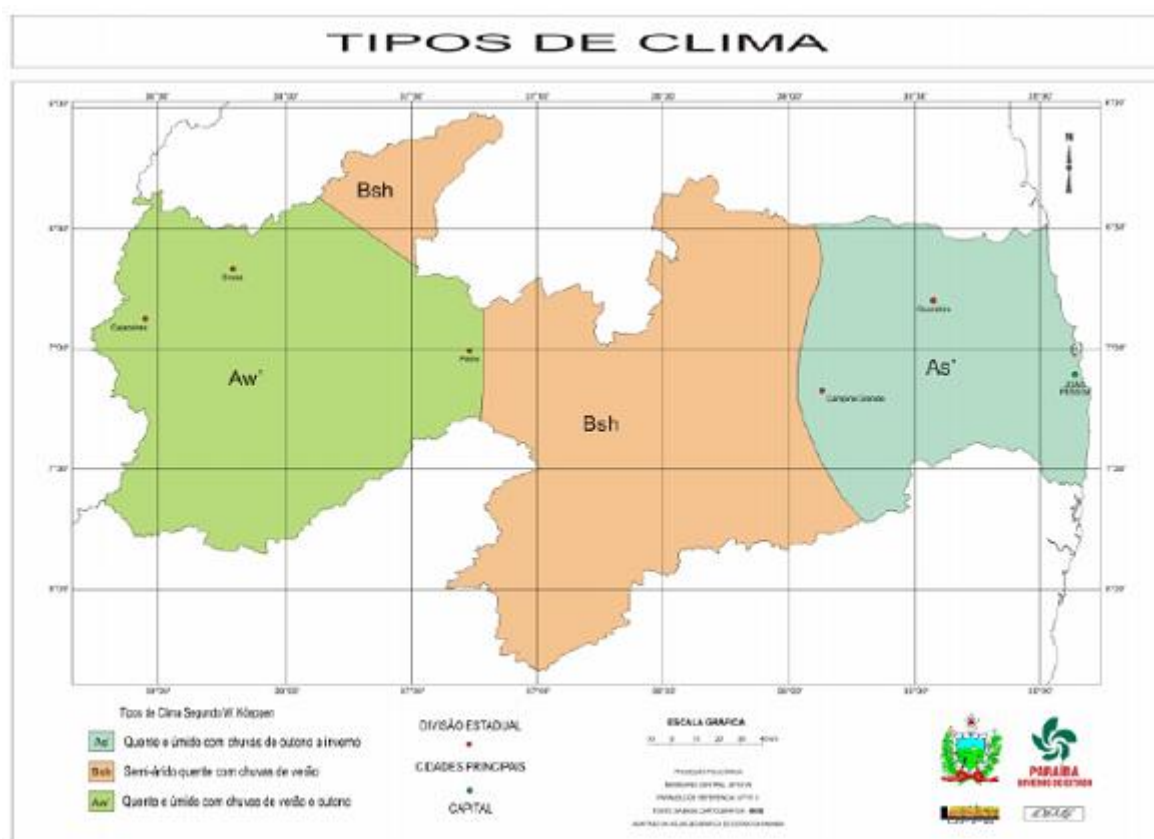


Figura 3. Divisão climática do Estado da Paraíba segundo W. Köppen. (BARBOSA, 2006).

3.3. Relevo e Solos

A área da encosta selecionada ocupa uma superfície de aproximadamente 2,0 ha, com altitude variando entre 570 a 600 m. Na parte de maior altitude o relevo da encosta tem forma côncava e, logo em seguida, observa-se uma disposição linear apresentando, de maneira geral, variações entre ondulado a forte ondulado (Figura 4).

O solo da área em estudo foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO AMARELO distrófico, tendo solos predominantes na microbacia classificados por Brasil (1972), como uma associação enquadrando-se na nova classificação proposta pela

EMBRAPA (2006), como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico e NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico e, em menor proporção, o NEOSSOLO REGOLÍTICO e o LATOSSOLO AMARELO distrófico (Figura 5).

Em relação aos tipos de uso da terra na microbacia destacam-se dois tipos predominantes: uma área de reserva ecológica (mata nativa) e outra de agropecuária familiar (GALVÃO et al., 2005; SANTOS et al., 2009). A pastagem (*Brachiaria decumbes*) é o tipo de uso com maior área de abrangência, razão de ser a principal atividade econômica desta região (GALVÃO et al., 2005; SANTOS et al., 2009), sendo então o sistema de uso abordado na pesquisa.

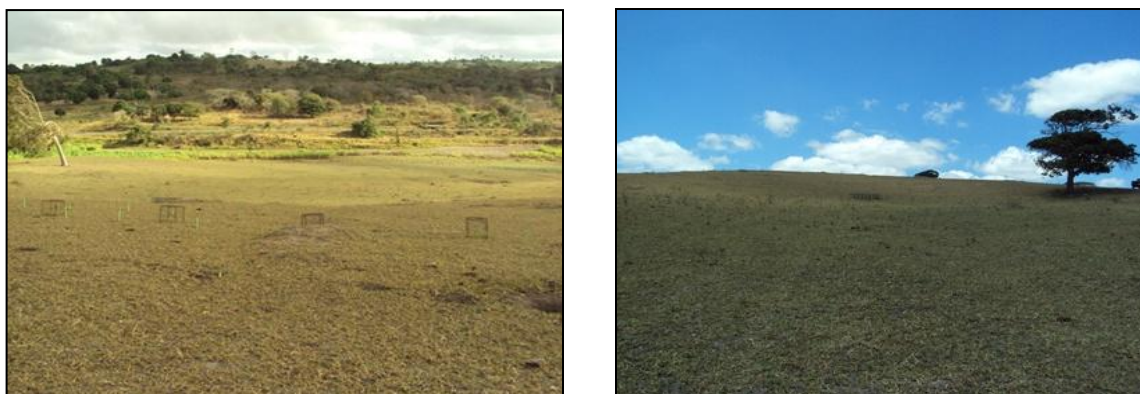


Figura 4. Relevo da área de encosta na microbacia Vaca – Brava, PB.

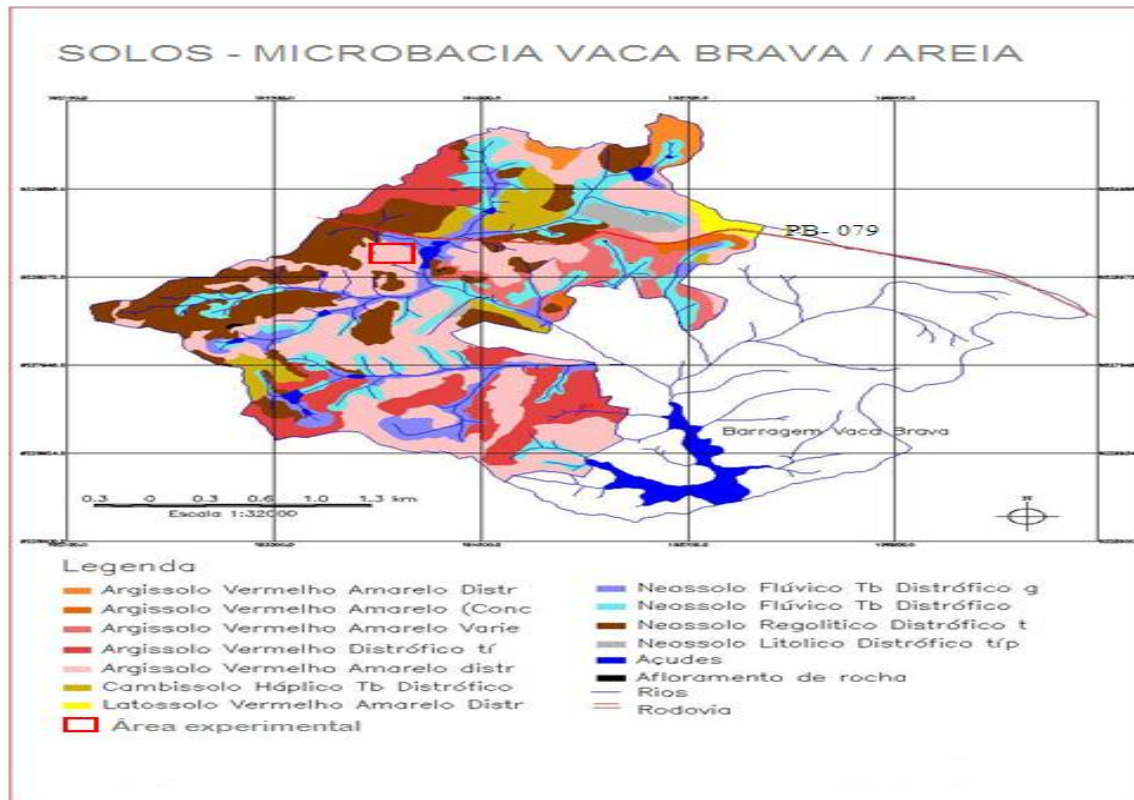


Figura 5. Mapa de Solos, da microbacia hidrográfica Vaca Brava – Areia – PB (desenvolvido no CCA/UFPB – Areia – PB (FARIAS, 2006).

3.4. Levantamento Topográfico e Georeferenciamento

Realizou-se um levantamento planialtimétrico georreferenciado utilizando GPS topográfico visando à demarcação dos limites que contornam a encosta onde foi realizado o estudo.

3.5. Caracterização Física do Solo

3.5.1. Resistência a Penetração

As leituras de RP foram realizadas no dia 15 de junho de 2011 em posições definidas da encosta (Ombro (OMB) = com altitude de 600 a 594 m; Meia Encosta (ME) = com altitude de 594 a 588 m e Encosta Inferior (EI) = com altitude de 586 a 570 m) seguindo uma grade sistemática de amostragem e georreferenciadas por um sensor de Sistema de Posicionamento Global (GPS) (Figura 6).

Utilizou-se o equipamento PLG5200 - Medidor Automatizado de Compactação do Solo da Solo Track (Falker – automação agrícola) capaz de medir a resistência à penetração do solo de forma automatizada. As distâncias consistiram na elaboração de uma grade com malha regular em intervalos de 5,0, 10,0 e 20,0 m na mesma linha entre os pontos amostrais, perfazendo um total de 108 pontos até a profundidade de 30 cm, e posteriormente, estratificada em camadas de 0-10 cm; 11-20 cm e 21-30 cm para a RP do solo da área da encosta (Figura 7; Apêndices A, B e C).

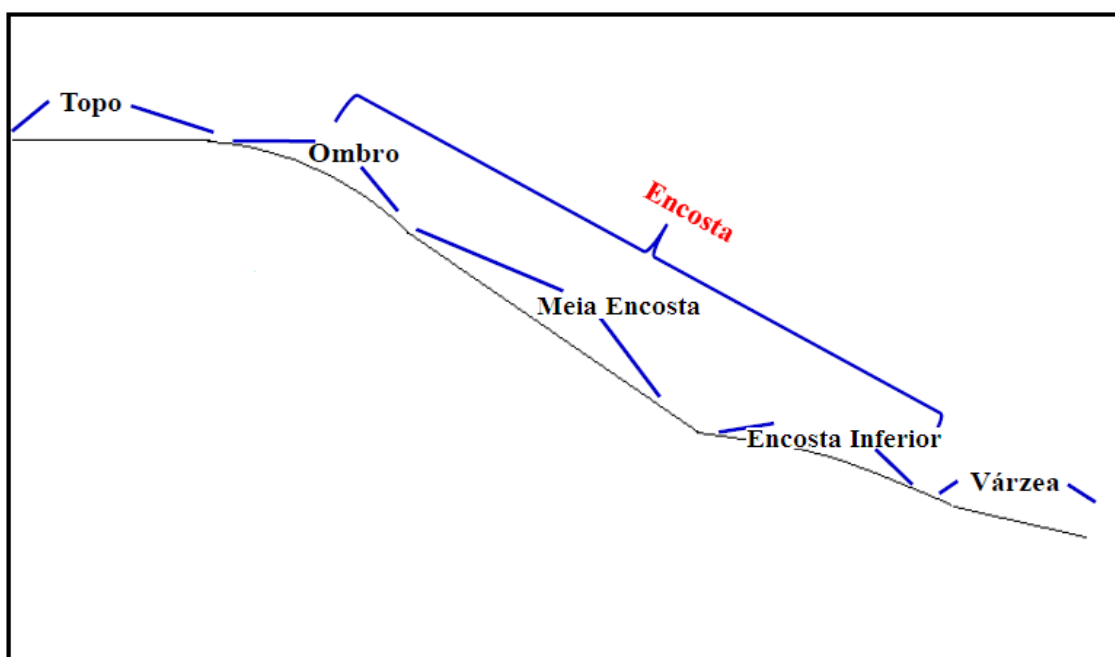


Figura 6. Distribuição das posições na toposequência (BREHM, 2010).

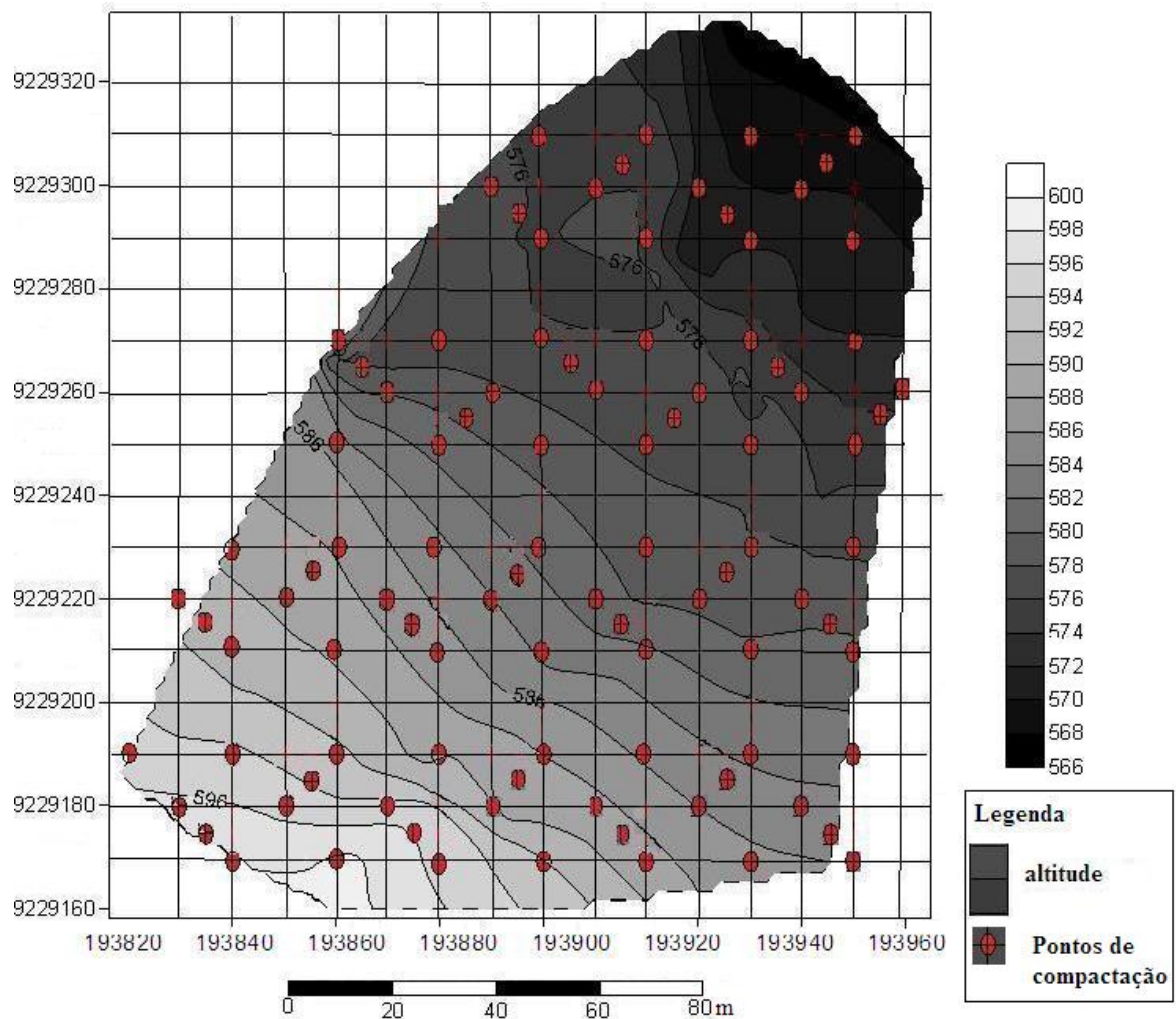


Figura 7. Grade regular da área de encosta georreferenciada com distribuição dos pontos de leitura de resistência a penetração.

Após serem geradas as estimativas, foi realizada a confecção dos mapas temáticos, com o software Surfer versão 9.0 Demo.

3.6. Análise Geoestatística

A análise geoestatística, foi realizada pelo software GS+ (Gamma Design Software) versão 9.0 Demo, pelo método de interpolação “Krigagem”, para análise de dependência espacial, e construção dos semivariogramas, e por fim observar a distribuição espacial dos dados de resistência à penetração por meio da geração de mapas temáticos.

Os semivariogramas foram construídos com os valores médios de compactação nas profundidades de 0-10 cm; 11-20 cm e 21-30 cm. Posteriormente, comparou-se estes valores utilizando-se a classificação de Trangmar et al. (1985), que definiram um parâmetro de comparação baseado no tamanho relativo do efeito pepita, chamado de

indicativo de dependência espacial (IDE), o qual possibilita a comparação do tamanho relativo do efeito pepita entre os atributos do solo, dado pela equação:

$$\text{IDE} = (\gamma(h) \text{ pepita} / \gamma(h) \text{ total}) \times 100$$

Sendo:

IDE, Indicativo de dependência espacial;

$\gamma(h)$ pepita, semivariância do efeito pepita;

$\gamma(h)$ total, semivariância total ou patamar;

C_0 = Efeito Pepita;

$C_0 + C_1$ = Patamar;

O aplicativo GS⁺ trabalha com a seguinte relação:

$$\% \text{ Semivariância Estrutural} = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \cdot 100$$

Os resultados do IDE foram classificados da seguinte forma:

Dependência Espacial Fraca < 25%;

Dependência Espacial Moderada entre 25% e 75%;

Dependência Espacial Forte > 75%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Variográfica

Os parâmetros dos modelos matemáticos dos semivariogramas ajustados as variáveis de resistência à penetração em diferentes profundidades são apresentados na Tabela 1. A RP apresentou dependência espacial para todas as posições e profundidades analisadas, isto significa que o menor espaçamento na grade amostral foi suficiente para a explicação do fenômeno na área, divergindo dos resultados encontrados por Abreu et al. (2003) analisando a variabilidade espacial da RP nas profundidades subsuperficial (10-17,5 cm) realizadas em um ARGISSOLO VERMELHO AMARELO franco arenoso de relevo suave ondulado. Souza et al. (2001) afirmam que as propriedades físicas variam no tempo e no espaço, e também, de um local para o outro, esta variação pode ser contínua ou pode manter uma dependência espacial, e estas ocorrem em função do tipo de manejo e das características inerentes aos solos. Lima et al. (2009) analisando a variabilidade espacial da RP em uma área de encosta da bacia hidrográfica de Itapemirim – ES, encontraram ausência de dependência espacial para distâncias maiores que a distância amostral de 10 m sob pastagem e vegetação secundária sob regeneração natural.

A expressão $C_0/(C_0+C_1)$ é uma análise elaborada em percentual do parâmetro efeito pepita em relação ao patamar com propósito de comparar o grau de dependência espacial das variáveis em estudo, denominado de indicativo de dependência espacial (IDE) (TRANGMAR et al., 1985). Os valores da relação do efeito pepita e patamar foram 35% para as camadas de 0-10 cm e 21-30 cm, e de 5,0% para a camada 11-20 cm (Tabela 1). Segundo a classificação dos mesmos autores todos os modelos esféricos do presente estudo apresentaram IDE moderada ($25\% < IDE < 75\%$), tendo coeficiente de determinação (R^2) da relação entre a semivariância e o modelo ajustado de 0,70 e 0,80 para as camadas de 0-10 cm e 21-30 cm, respectivamente. Estes valores são semelhantes aos de Lima et al. (2009) que encontraram R^2 0,84 no terço médio de uma encosta sob vegetação nativa na bacia hidrográfica de Itapemirim – ES.

Foi atribuída a classificação fraca para o modelo exponencial ($IDE < 75\%$) na camada de 11-20 cm tendo como R^2 de 0,20. Este valor é semelhante ao encontrado por Silva et al. (2004) analisando a variabilidade espacial de RP em um ARGISSOLO VERMELHO AMARELO arênico que constatarem coeficiente de determinação entre 0,20 a 0,60 para as profundidades de 12 a 20 cm de profundidade, com exceção a camada de 15 cm, e ajuste exponencial do semivariograma e IDE moderada.

Segundo Cavalcante et al. (2011) quando o grau de dependência espacial é forte e moderado significa que a distribuição dos atributos não é aleatória. Este fato pode ser verificado para as leituras de compactação nas camadas de 0-10 e 11-20 cm de profundidade, porém para a camada de 11-20 cm, determinações feitas logo após o valor do alcance (11 m) indicariam uma distribuição aleatória no espaço para a RP indicando maior variabilidade da RP para esta camada (Tabela 1). Cambardella et al. (1994) evidenciam que quanto mais fortemente for a dependência espacial, mais é possível afirmar que uma variável, a exemplo da RP, é influenciada pelas propriedades intrínsecas do solo, como a densidade do solo, porosidade, teor de água, etc. Já aqueles atributos com dependência fraca são mais influenciadas por fatores externos, por exemplo, o relevo, o manejo do solo, pisoteio animal dentre outros (MELO, 2011).

Para as profundidades de 0-10 cm e 21-30 cm o modelo ajustado foi o esférico para a estimativa dos dados, apresentando efeito pepita de 99400 e 155500 e patamar de 281400 e 441100, respectivamente. Segundo Isaaks e Srivastava (1989) o modelo do tipo esférico é um dos que melhor podem descrever fenômenos com maior continuidade sem variações muito brusca e em pequena escala.

Para a profundidade de 11-20 cm o modelo ajustado foi o exponencial com efeito pepita 8500 e patamar de 168800 (Tabela 1). Esse mesmo tipo de modelo geoestatístico também foi ajustado para as profundidades de 12, 17, 20 e 25 cm por Silva et al. (2004) avaliando a variabilidade espacial da RP em um Argissolo Vermelho Amarelo arênico. De maneira geral, Marasca et al. (2011) citam os modelos esféricos e exponencial como sendo os de maior ocorrência para este atributo do solo.

A partir dos modelos ajustados aos semivariogramas, os maiores valores de alcances estimados para a RP foram de 153 m e 187 m encontrados nas camadas de 0-10 cm e 21-30 cm, respectivamente (Tabela 2). Panosso (2006) relata que dentre os parâmetros geoestatísticos, o alcance possui considerável grau de importância, pois representa a distância máxima em que pontos de uma mesma variável estão correlacionados espacialmente entre si. Isto indica que através da geoestatística podemos verificar a relação espacial que há da RP entre as distintas posições na encosta e nas diferentes profundidades. Estes valores para o alcance são superiores aos encontrados por Marasca et al. (2011) que encontraram alcance próximo a 20 m e RP variando de 2,9 a 4,3 MPa nas mesmas profundidades.

A RP na camada de 11-20 cm foi a que apresentou o menor alcance (11 m) indicando que há uma maior variabilidade e menor dependência espacial dessa variável para esta profundidade do que para as demais profundidades analisadas na área da encosta

(Tabela 1). Possivelmente este fato, pode ser explicado por a menor distância na grade amostral não ter sido suficiente para a obtenção de uma amostragem real mais precisa para a RP nesta camada, que apesar de haver uma fraca dependência espacial na camada de 11-20 cm o modelo ainda demonstra um baixo coeficiente de determinação para os dados amostrados. Valores estes, inferiores aos encontrados por Fidalski et al. (2006) que constatarem alcances de 19 e 17 m para as profundidades de 10-15 e 15-20 cm.

Tabela 1. Parâmetros matemáticos dos semivariogramas para valores de resistência a penetração do solo

Camada	Modelo	R ²	Efeito Pepita (C ₀)	Patamar C ₁	C ₀ /(C ₀ +C ₁)	Alcance (a)	IDE
0-10 cm	Esférico	0,70	99400	281400	35	153	Moderada
11-20 cm	Exponencial	0,20	8500	168800	5	11	Fraca
21-30 cm	Esférico	0,80	155500	441100	35	187	Moderada

R²= Coeficiente de determinação; IDE=Índice de Dependência Espacial.

Na Figura 8 são representados os semivariogramas utilizados para a interpolação por krigagem para análise da estrutura de dependência espacial e dos processos intrinsecamente estacionários e isotrópicos em estudo. Neste caso, os semivariogramas para a profundidade de 0-10 cm e 21-30 cm (Figura 8 A e C) ajustaram-se ao modelo esférico. Melo (2011) revela que quando os semivariogramas apresentam efeito pepita, os valores da semivariância $\gamma(h)$ confrontados com os valores das distâncias (h) já apresentam algum valor quando $h=0$. Abreu et al. (2003) afirmam que quando o semivariograma é crescente e dependente da distância, deve-se ajustar um modelo que melhor ilustra o comportamento da variabilidade da variável em função da distância. Lima et al. (2008) ressaltam que os ajustes dos modelos indicam que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais. Na camada de 11-20 cm o semivariograma foi ajustado ao modelo exponencial revelando um efeito pepita e patamar abaixo das demais camadas. (Figura 8 B).

Dos métodos modelados aos semivariogramas da resistência a penetração, o modelo esférico foi o que apresentou maiores coeficientes de determinação (0,70 e 0,80), respectivamente, para os semivariogramas A e C (Figura 8). O modelo exponencial (Figura 8 B) apresentou coeficiente de determinação menor que o modelo esférico. Segundo Azevedo (2004) R² com valores acima de 0,50 demonstram ajustes dos semivariogramas que possibilitam geração de mapas da distribuição espacial de RP de forma confiável.

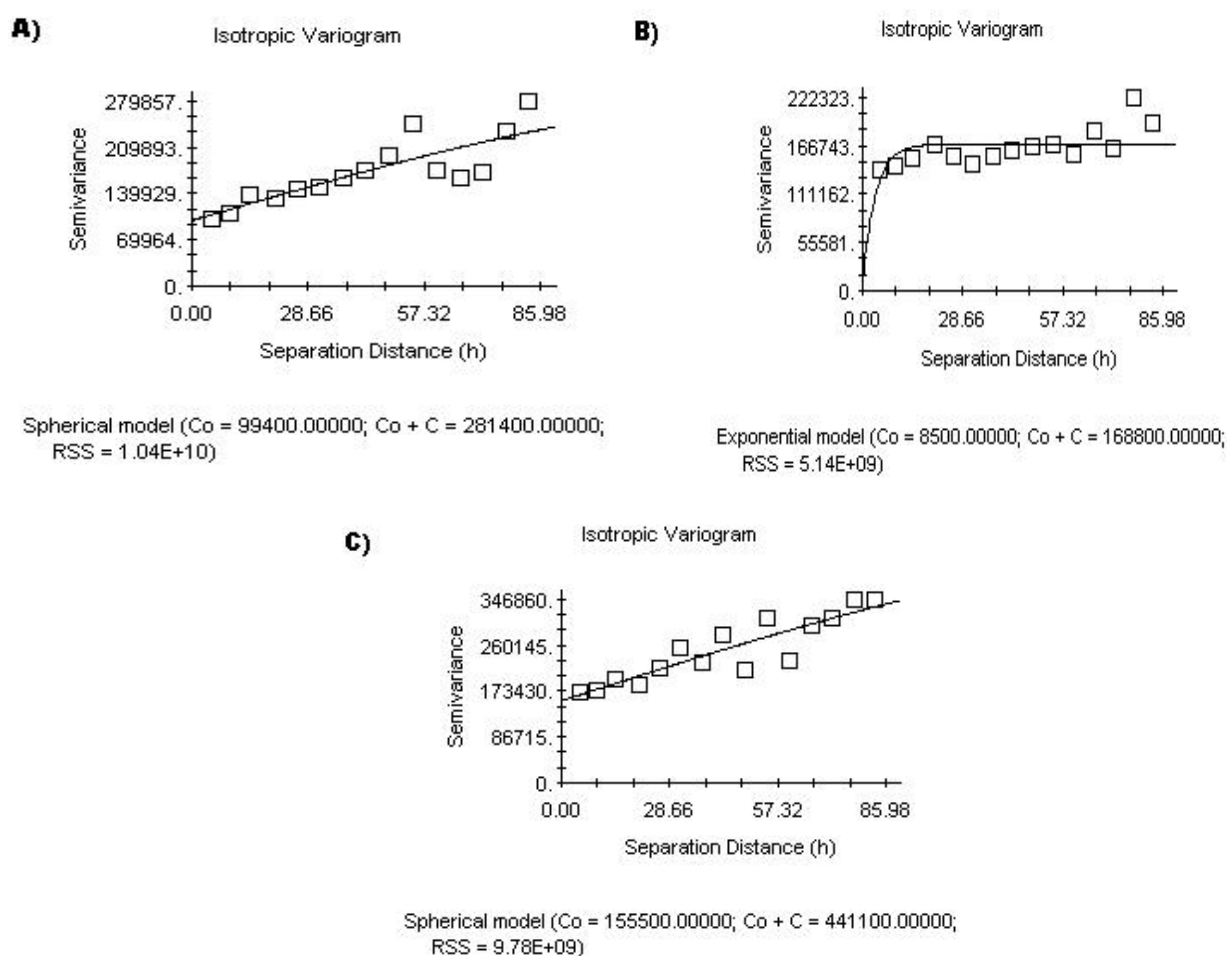


Figura 8. Semivariogramas ajustados para o atributo resistência a penetração nas profundidades de 0-10 cm (A), 11-20 cm (B) e 21-30 cm (C) em área de encosta.

Na Figura 9 pode-se observar que independente da altitude os valores de RP são semelhantes, demonstrando uma suave tendência à redução da RP com o aumento da altitude nas camadas de 11-20 cm e 21-30 cm. Nas camadas de maior profundidade os valores de resistência a penetração situaram-se nas faixas de 1,0 a 2,0 MPa apresentando maiores concentrações de compactação do solo. Em contraste com os resultados encontrados por Lima et al. (2009) que verificaram aumento nos valores de RP para as profundidades de 0 a 0,20 m a partir da parte central para a parte mais baixa do terço médio da rampa de uma encosta sob vegetação nativa.

Comportamento oposto ocorre na camada de 0-10 cm em que há uma tendência de aumento da compactação do solo com o aumento da altitude. Em relação à profundidade, esta mesma camada demonstra uma concentração de valores de compactação oscilando na faixa de 1,0 a 1,5 MPa (Figura 9). Dessa forma, pode-se afirmar

que esta camada encontra-se menos compactada que as demais profundidades. Esses valores são semelhantes aos encontrados por Silva et al. (2004) que avaliando a variabilidade espacial da RP em diferentes tipos de solo puderam constatar em um ARGISSOLO VERMELHO AMARELO arênico valores de RP nas faixas de 1,0 a 1,84 MPa nas profundidades de 5 até 10 cm. Estes autores ressaltam que as camadas mais superficiais estão propensas a sofrerem maiores efeitos da atividade biológica e ciclos de umedecimento e secagem que favoreceriam a maior variabilidade e dispersão dos valores de RP. Segundo Souza et al. (2003) as propriedades do solo variam no espaço segundo um arranjo definido por diferentes fatores e que essa variabilidade depende muito mais da posição e forma da vertente do que ao acaso.

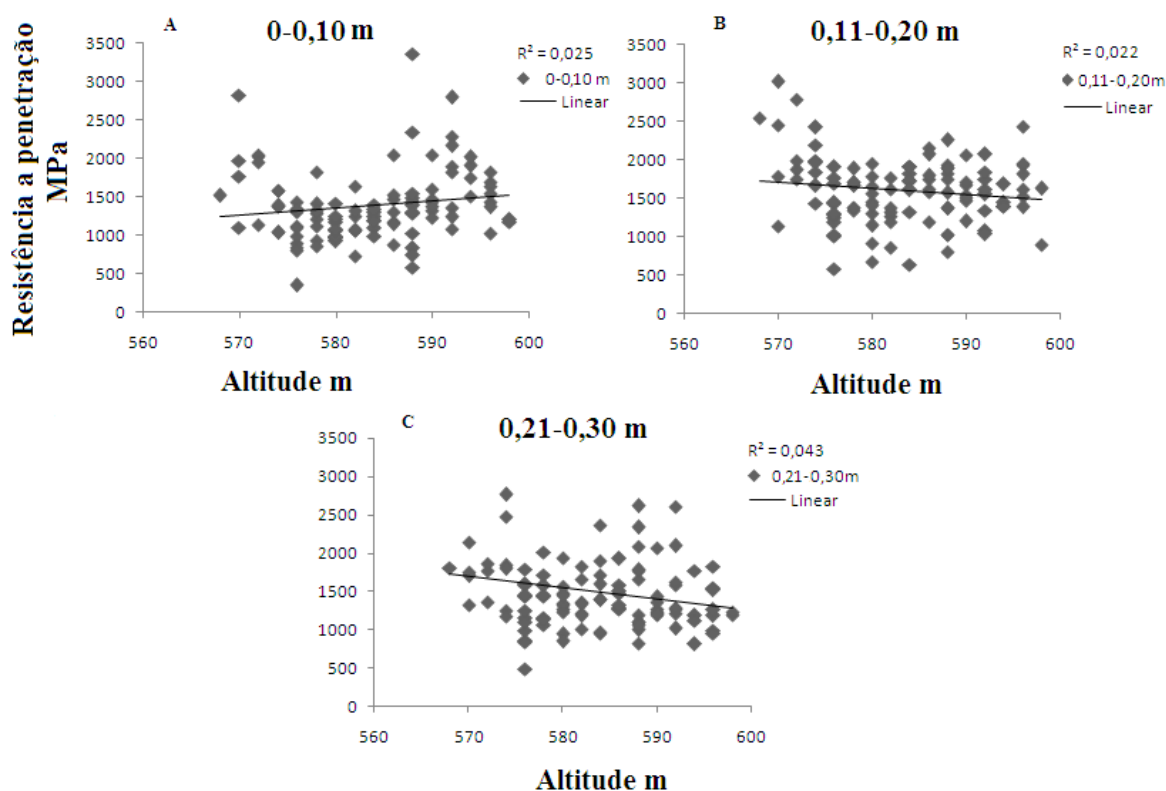


Figura 9. Dispersão dos valores de desvios da resistência à penetração em relação à altitude da encosta.

Após a análise variográfica dos parâmetros avaliados é necessário obter estimativas confiáveis para a determinação da regionalização das variáveis para um possível mapeamento do atributo físico de RP. As ferramentas estatísticas possibilitam a análise de dependência espacial, como também a estimativa de dados para locais não amostrados (DALBIANCO, 2009). Portanto, a definição de um modelo apropriado aos dados amostrais é a base para a obtenção de uma estimativa bem sucedida. Neste caso, esta procedência se dá através de um valor medido num ponto específico da malha que é

temporariamente desconsiderado dos dados amostrais, e este mesmo valor é estimado utilizando os valores das amostras vizinhas (PANOSSO, 2006; VIERA, 2000).

Na Figura 10, podemos observar que há alterações significativas no comportamento da RP. Essas mudanças são mais evidentes no perfil B, ou seja, é na subsuperfície (11-20 cm) que ocorre às maiores variações da RP quando comparado aos demais perfis do solo. Tal fato comprova-se devido ao ajuste do modelo exponencial que não representa bem ($R^2=0,20$) as estimativas dos dados amostrais não obtendo boa credibilidade na construção do padrão espacial (mapas) em relação ao modelo esférico. Isaaks e Srivastava (1989) explicam que o modelo exponencial descreve uma função aleatória mais errática em pequenas distâncias, quando comparado ao modelo esférico, caracterizando eventos que variam bastante em pequena escala. O que os autores evidenciam é que há mudanças abruptas em todas as distâncias estimadas por este modelo.

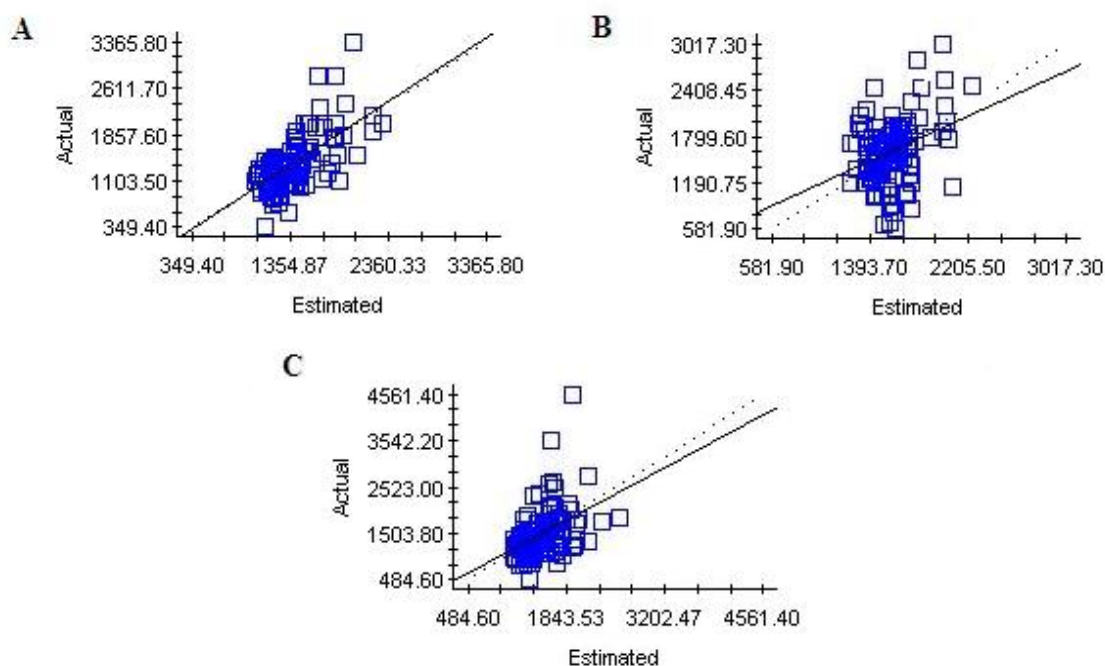


Figura 10. Valores de frequência reais e estimados para a resistência a penetração do solo em área de encosta (A=0-10 cm – modelo esférico; B=11-20 cm – modelo exponencial e C=21-30 cm – modelo esférico).

A partir da geração dos semivariogramas para a resistência a penetração foi possível elaborar mapas de distribuição espacial deste atributo do solo por krigagem através de estimativas em locais não amostrados (Figura 11). A resistência à penetração (Figura 11 A) demonstrou uma relação direta com a altitude, à medida que a altitude diminuiu a compactação apresentou mesma tendência na camada de 0-10 cm. Nesta faixa de profundidade o segmento OMB foi a que apresentou maiores valores para a RP, oscilando entre 2,2 a 3,4 MPa quando comparado aos segmentos ME e EI, e apresentou

uma fração mínima de RP próxima a 1,0 e 1,7 MPa. A maior compactação presente na posição do OMB deve-se, possivelmente, ao arraste de partículas que a camada superficial sofre pelos processos erosivos tendo parte do seu material depositado nas posições inferiores. Ao longo da encosta os segmentos ME e EI apresentaram maior continuidade para a compactação entre 0,6 a 1,2 MPa. Esses resultados diferem dos de Brito et al. (2006) que constatarem maiores valores para a RP na profundidade de 0-15 cm a medida em que a elevação da altitude reduzia-se, com valores na faixa de 1,37 a 2,62 MPa para as posições de OMB e EI respectivamente. Souza et al. (2004) encontraram valores superiores para a RP (2,2 a 6,2 MPa) em relevo côncavo na profundidade de 0-20 cm. Alguns autores sugerem um limite crítico ao crescimento radicular para a compactação em função do uso e do manejo do solo em torno de 2,0 a 3,0 MPa (IMHOFF et al., 2001; TORMENA, 1998). Hakansson e Voorhees (1997) revelam que a compactação do solo pode ocorrer mesmo em áreas agrícolas com pouco revolvimento do solo até a profundidade de 40 cm. Dessa forma, pode-se identificar uma zona compactada na camada superficial (0-10 cm) do segmento OMB entre às profundidades (Figura 11 A).

Na camada subsuperficial houve aumento da resistência a penetração do solo em profundidade entre os perfis 0-10 cm até 11-20 cm (Figura 11 A e B). Lima et al. (2009) observaram maiores valores para a RP (5,95 MPa) nas profundidades de 0-20 cm no terço médio de uma encosta sob pastagem. Os menores valores para o alcance na camada 11-20 cm demonstraram a maior variabilidade e a menor continuidade da RP para todos os segmentos da encosta, principalmente para as posições do OMB e ME que tiveram oscilações de compactação desde 0,7 até valores próximo a 2,0 MPa, refletindo a influência do relevo sobre o atributo RP somado ao mau manejo sobre a pastagem em que havia a utilização de arado na área, principalmente, a ME em que havia exposição do solo em alguns pontos da área evidenciando a má proteção aliado a perda de solo da camada mais superficial. Souza et al. (2004) também encontraram menores alcances para RP sob diferentes formas de relevo com o aumento da profundidade indicando a menor continuidade na distribuição espacial para esta variável. Brito et al. (2006) afirmam que o manejo adequado pode ser estabelecido às culturas de acordo com o local na paisagem, pois a variação dos atributos do solo podem ser diferenciados em cada segmento da encosta.

Na camada de maior profundidade (Figura 11 C) observa-se a maior continuidade para as menores faixas de compactação do solo, principalmente nos segmentos de ME e EI que tiveram valores oscilando de 1,0 a 1,4 MPa. Essa menor compactação no segmento da EI para esta profundidade ocorre devido a maior concentração de partículas de areia

depositadas ao longo do tempo. Brehm (2010) verificou que os maiores teores de areia foram encontrados na posição da encosta inferior devido a mesma ser considerada uma zona de deposição. A maior continuidade e a menor variabilidade da RP para este segmento ocorrem devido aos mesmos estarem dispostos em um relevo considerado linear e de maior homogeneidade. Souza et al. (2004) também verificaram mesmo comportamento avaliando a variabilidade dos atributos físicos sob diferentes formas de manejo. Canellas et al. (2000) afirmam que áreas em declives sofrem perdas de sedimentos para outros locais e Lima et al. (2008) ressaltam que quando os relevos são ondulados há contribuições para o surgimento de diferenças marcantes nas propriedades do solo, pois os processos erosivos estabelecem-se com intensidade variável em função da cobertura vegetal, da forma e posição no relevo. Reichert et al. (2003) afirmam que solos argilosos apresentam maior intensidade de compactação, porém esses solos são mais resistentes a desagregação, enquanto, solos arenosos apresentam menores problemas de compactação, no entanto, revelam alta susceptibilidade a desagregação. Souza et al. (2004) retratam que o desenvolvimento de pesquisas relacionando as distintas formas de relevo na paisagem, altitude, declividade aos atributos do solo são importantíssimos e determinantes para a adoção de técnicas de manejo do solo. Apenas uma parte do OMB e da ME apresentam zonas compactadas nas faixas de 2,0 a 2,2 MPa, sendo verificado maiores valores de RP na parte nordeste da EI alcançando valores entre 4,0 a 4,4 MPa.

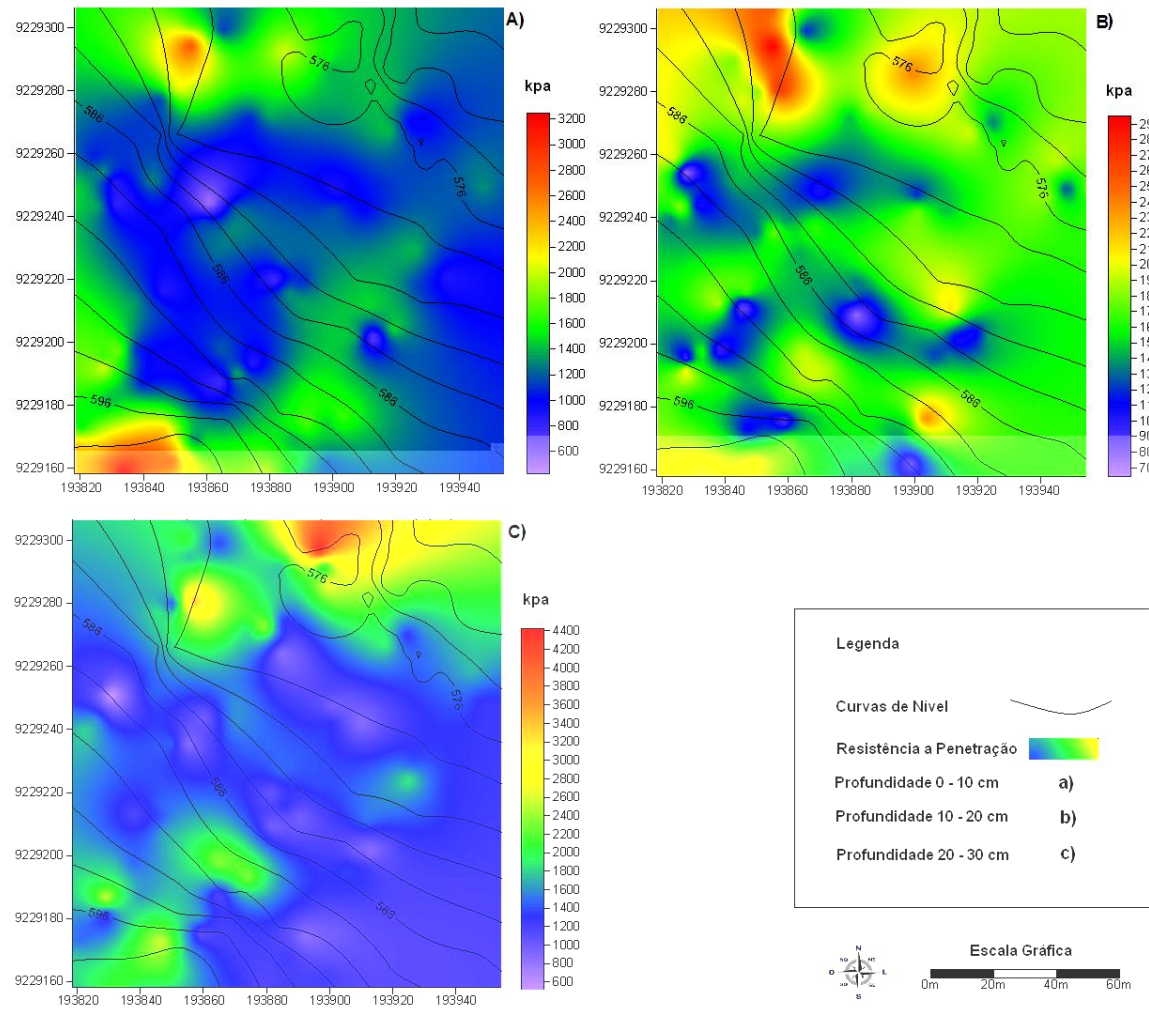


Figura 11. Mapas de distribuição espacial de resistência à penetração para as profundidades de 0-10 cm (A); 11-20 cm (B) e 21-30 cm (C) em área de encosta.

5. CONCLUSÕES

A RP apresentou dependência espacial para todas as posições e profundidades analisadas podendo ser relacionadas com as variações das posições do relevo.

As camadas de 0-10 e 21-30 cm foram ajustados ao modelo esférico com indicativo de dependência espacial moderado.

A camada de 11-20 cm foi ajustado ao modelo exponencial com grau de dependência espacial fraco.

Os maiores alcances para a RP foram verificados para as camadas de 0-10 e 21-30 cm, enquanto que na camada de 11-20 cm obteve-se o menor valor para o alcance demonstrando maior variabilidade e a menor continuidade espacial.

Os maiores valores para a RP do solo foram encontrados no segmento do OMB dentre todas as profundidades, identificando-se uma zona compactada neste segmento na camada mais superficial.

Houve aumento da resistência à penetração em profundidade em todas as posições da encosta na camada subsuperficial entre os perfis 0-10 cm até 11-20 cm.

Na camada de 21-30 cm houve a maior continuidade para as menores faixas de compactação abrangendo, principalmente, os segmentos ME e EI.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S.L. REICHERT, J.M.; SILVA V.R. da; REINERT, D.J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo franco arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, p.275-282, 2003.
- AZEVEDO, E.C. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no Estado de Mato Grosso**. 132 f. 2004. Tese (Doutorado em Água e Solo) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- BRASIL. **I-Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado da Paraíba**. JACOMINE, P.K.T; RIBEIRO, M.R. e MONTENEGRO, J.O. II-Interpretação da aptidão agrícola dos solos do Estado da Paraíba, (EPE/EPFS. Boletim Técnico, 15 – SUDENE/DRN. Série Pedologia, 8), Rio de Janeiro, 1972, 683p.
- BARACUHY, J.G. de V.; KURTZ, S.M. de J.M. KURTZ, F.C.; DUARTE, S.M.A.; LIMA, V.L.A. de; ROCHA, J.S.M. da e NETO, J.D. Deterioração físico-conservacionista da microbacia hidrográfica do riacho Paus Brancos, Campina Grande, PB. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.159-164, 2003.
- BARBOSA, F. de A. dos R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape** – PB. 116 f. 2006. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.
- BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J. e O’SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A. e MULLINS, C.E, eds. **Soil environmental analysis: physical methods**. 2.ed. Marcel Decher, p.377-403. 2001.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J.A. de; ALMEIDA, E.X. de; KURTZ, C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem capim-elefante-anão cv. Mott. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.35, p.1047-1054, 2000.
- BREHM, M.A. da S. **Estabilidade e distribuição do tamanho de agregados em duas topossequências sob pastagem com diferentes níveis de conservação**. 44 f. 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Areia.
- BRITO, L.F.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D.A.; CALZAVARA, S.A. e OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, 36:1749-1755, 2006.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P. da C.; SILVA, A.P. da. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **R. Bras. de Ci. Solo**, 30:787-794, 2006.
- CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. **R. Bras. de Ci. Solo**, v.34, p.617-630, 2010.

CAMARGO, E.C.G e FUKS, S.D. (2001). Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G. **Geoprocessamento: teoria e aplicações**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>> Acesso em: dez. de 2011.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CANELLAS, L.P.; BERNER, P.G.; SILVA, S.G.; SILVA, M.B.; SANTOS, G.A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.35, n.1, p.133-143, 2000.

CASTRIGNANO, A.; GIUGLIARINI, L.; RISALITI, R. Study of spatial relationships among some soil phyfco-chemical properties of a field in central da Italy using multivariate geostatistics. **Georderma**, Amsterdam, v.97, n.1-2, p.39-60, 2000.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M. de; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.15, n.3, p.237-243, 2011.

CETIN, M. e KIRDA, C. Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low- quality water. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 272, n. 1/4, p.238-249, 2003.

CUNHA, J.P.A.R. da; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, v.10, n.1-4, Jan./Dez., 2002.

CUNHA, P. JÚNIOR, J.M.; CURI, N.; PEREIRA, G.T.; LEPSCH, I.F. Superfícies geomórficas e atributos de latossolos em uma sequência areníticobasáltica da região de Jaboticabal (Sp). **R. Bras. Ci. Solo**, 29:81-90, 2005.

DALBIANCO, L. **Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural**. Dissertação (Mestrado). 116 f. Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Brasília, 2006. 354p.

FARIAS, L.C. **Diagnóstico Físico-Conservacionista das terrase percepção comunitária – bacia hidrográfica de Vaca Brava – Areia, Pb**. 109 f. 2006. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências Agrárias, Areia.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A.; JÚNIOR, R.S.O. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico. **Ciência Rural**, v.36, n.6, nov-dez, 2006.

FORSYTHE, W.M. **Importancia de la variabilidad de lãs propiedades del suelo para evaluarles en su manejo**. Turrialba, 20:445-451, 1970.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P.; PERES, F.S.C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II - Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **R. Bras. Ci. Solo**, v.33, p.805- 818, 2009.

GALVÃO, S.R.S; SALCEDO, I.H. e SANTOS, A.C. Frações de carbono e nitrogênio em função da textura, do relevo e do uso do solo na microbacia do agreste em Vaca Brava (PB). **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.29, p.955-962, 2005.

GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C. e LIMA, J.M.J.C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – mineralogia da fração argila. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.30, p.293-306, 2006.

GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; FILHO, J.V. de A.; ASSIS, R.L. de; SILVA, G.P.; PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.67-75, jan./abr. 2006.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.169-177, 2005.

GUIMARÃES, E.C. **Geoestatística básica e aplicada**. UFU/FAMAT. Uberlândia - MG, Apostila, 77p, 2004.

HAKANSSON, I., VOORHEES, W.B. **Soil compaction**. In: LAL, R., BLUM, W.H., VALENTIN, C., et al. (eds.) *Methods for assessment of soil degradation*. Boca Raton: Lewis, p.167-179. 1997.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

ISAAKS, E.H. e SRIVASTAVA, R.M. **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

KLEIN, V.A. e LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **R. Bras. de Ci. Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, out./dez. 2002.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B.; CÂMARA, C. Implicações da colheita florestal e do preparo do solo na erosão e assoreamento de bacias hidrográficas. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.) **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. Cap. 11, p.373-391.

LIMA, A.G.; SALCEDO, I.H. e FRAGA, V.S. Composição botânica e cobertura do solo de pastagens de Brachiaria, em função da forma e posição no relevo. In: **Fertilidade do solo e produção de biomassa no Semi-árido**. Ed. universitária da UFPE, Recife, 2008. p.89-104.

LIMA, J.S. de S.; OLIVEIRA, P.C.; OLIVEIRA, R.B. de e XAVIER, A.C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.5, p.931-938, 2008.

LIMA, J.S. de S.; SATTLER, M.A.; PASSOS, R.R.; OLIVEIRA, P.C.; SOUZA, G.S. de. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob pastagem e vegetação secundária em regeneração natural. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.29, n.2, p.185-195, abr./jun. 2009.

MACHADO, P.L.O. de A.; BERNARDI, A.C. de C. e SILVA, C.A. Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio. In: Valencia, L.I.O.; MEIRELLES, M.S.P e BETTINI, C. **Geoestatística aplicada a agricultura de precisão**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 202. 2004.

MARASCA, I.; OLIVEIRA, C.A.A. de; GUIMARÃES, E.C.; CUNHA, J.P.A.R. da; ASSIS, R.L. de; PERIN, A. e MENEZES, L.A.S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e teor de água em sistema de plantio direto, na cultura da soja. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 27, n. 2, p. 239-246, Mar./Apr. 2011.

MELO, R.S. de S. **Comparação de métodos de interpolação de teores de carbono no solo em escala de microbacia**. 37 f. 2011. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, Areia.

MIGUEL, F.R.M.; V.S.R. e GREGO, C.R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.44, n.11, p.1513-1519, nov. 2009.

MOSCA, A.A. de O. **Caracterização de duas bacias hidrológicas visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas**. 88 f. 2003. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

MÜLLER, M.M.L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **R. Bras. Ci. do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.531-8, 2001.

MUSY, A. e SOUTTER, M. **Physique du sol**. Laussane, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1991. 335p..

NASCIMENTO, J.B.; CARVALHO, G.D.; MENDONÇA, L.; MOREIRA, C. A.; LEANDRO, W. M. Análise da compactação do solo, em áreas sob manejo sustentável no entorno de Goiânia, GO. **Rev. Bras. de Agroecologia/out**. v.2. n.2. 2007.

OLIVEIRA, G.C.; JUNIOR, M.S.D.; RESCK, D.V.S. e CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, mar./abr. 2004.

PADILHA, J.A.; ZANGHETIN, M.F. de L.; ORTEGA, E. O uso da água nas microbacias hidrográficas do semiárido do nordeste brasileiro e o conceito base zero. **Proceedings of IV Biennial International Workshop "Advances in Energy Studies"**. Unicamp, Campinas, SP, Brazil. June 16-19, 2004.

PANOSSO, A.R. **Variabilidade espacial da emissão de CO², temperatura e umidade em latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar em sistemas de colheita manual com queima e mecanizada**. 53 f. 2006. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

PARKIN, T.B. Spatial variability of microbial processes in soil- A review. **Jornal Environmental quality**, Madison, v.22, p. 409-417, 1993.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

ROBOREDO, D.; MAIA, J.C. de S.; OLIVEIRA, O.J. de; ROQUE, C.G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um Latossolo Vermelho distrófico. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.30, n.2, p.307-314, mar./abr. 2010.

ROCHA, J.S.M. da; e KURTS, S.M.J.M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. 4 ed. Santa Maria: UFSM/CCR, 2001. 120p

ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C. e MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, 15: 421-248, 1991.

SÁNCHEZ, G.A.R. **Variabilidade espacial do carbono e outros atributos do solo em uma área destinada ao reflorestamento no Rio Grande do Norte**. 119 f. 2006. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

SANTOS, A.C.; SALCEDO, I.H. e CANDEIAS, A.L.B. Relação entre o relevo e as classes texturais do solo na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, PB. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.54, 2002.

SANTOS, A.C.; SALCEDO, I.H.; CANDEIAS, A.L.B. e GALVÃO, S.R.S. Influência do uso e da posição do perfil no relevo na fertilidade de solos em áreas de encosta. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v.39, n.1, p.31-37, 2009.

SILVA, F.L. M. da; CORRÊA, A.C. de B. Relações entre geossistemas e usos da terra em microbacia hidrográfica semi-árida: o caso do Riacho Gravatá/ Pesqueira – Pe. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 24, n. 1, jan/abr. 2007.

SILVA, V.R. ; REINERT, D.J. e REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:191-199, 2000.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 171 f. 2003. (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SILVA, V.R. da; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, n.2, mar-abr, 2004.

SILVA, G.J.; JÚNIOR, D.D.V.; BIANCHINI, A.; AZEVEDO, E.C. de.; e MAIA, J.C. de S. Variação de atributos físico-hídricos em latossolo vermelho-amarelo do cerrado mato-grossense sob diferentes formas de uso. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:2135-2143, 2008.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p.367-372, 1997.

SOUZA, Z.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; AMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P. e PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **R. Bras. Ci. Solo**, 25:699-707, 2001.

SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J.; M.V. MARTINS FILHO, M.V. e PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um latossolo em Jaboticabal (SP). **R. Bras. Ci. Solo**, 27:1067-1074, 2003.

SOUZA, Z.M. e ALVES, M.C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado, sob diferentes usos e manejos. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 7:18-23, 2003.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.; BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **R. Bras. Eng. Agríc. e Ambiental**, v.8, p.51-58, 2004.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 149 f. 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

THANACHIT, S.; SUDDHIPRAKARN, A.; KHEORUENROMNE, I.; GILKES, R.J. Geochemistry of soils on a catena on basalt at Khon Buri, northeast Thailand. **Geoderma**, Amsterdam, v.135, p.81-96, 2006.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 45-94, 1985.

TORMENA, C.A. **Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo**. 106 f. 1998. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

VALENCIA, L.I.O.; MEIRELLES, M.S.P.; BETTINI, C. Geoestatística Aplicada à Agricultura de Precisão. In: MACHADO, P.L.O. de A.; BERNARDI, A.C. de C.; SILVA, C.A. (Ed.) **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. Cap. 2. p. 37-56.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C. e REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. e COSTA, L.M., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2002. v.2, p.1-45.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: **GIS Brasil'98**. Curitiba: [s.n.], 1998. 53 p.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties, **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

APÊNDICES

Apêndice A. Valores médios de resistência à penetração (RP) para a posição do ombro em diferentes profundidades.

POSICÃO	Ombro		
	-----cm-----		
	0-10	11-20	21-30
Pontos de Compactação	RP* (MPa)		
65	1397	2433	989
66	1430	1521	948
67	1755	1439	815
86	1511	1392	1187
87	1371	1382	1186
88	1174	895	1193
89	1204	1624	1231
90	1026	1621	1822
91	1639	1809	1546
92	1543	1934	1262
93	1907	1399	1118
106	1827	1034	1618
107	2019	1679	1768
108	1821	1946	1518

* = valores médios (n=10) de resistência à penetração para cada profundidade.

Apêndice B. Valores médios de resistência à penetração (RP) para a posição da meia encosta em diferentes profundidades.

POSICÃO	Meia Encosta		
	-----cm-----		
	0-10	11-20	21-30
Pontos de Compactação	RP* (MPa)		
33	1289	1382	1188
34	1495	1023	1091
35	579	1024	824
61	1388	1368	999
62	1318	1198	1358
63	1436	1545	1274
64	1081	1344	1257
68	1597	1678	1235
81	1028	1568	1654
82	1301	800	1055
83	1456	1706	1427
84	1227	1464	1195
94	1241	1613	1583
95	2795	2072	2094
96	2282	1070	2600
97	1383	1504	1203

...continuação..

98	1546	1753	2617
101	2344	1889	1779
102	3366	2256	2084
103	2047	2057	2072
104	2164	1745	1017
105	1893	1843	1289

* = valores médios (n=10) de resistência à penetração para cada profundidade.

Apêndice C. Valores médios de resistência à penetração (RP) para a posição da encosta em diferentes profundidades.

POSIÇÃO	Encosta Inferior		
	-----cm-----		
	0-10	11-20	21-30
Pontos de Compactação	RP* (MPa)		
1	1175	1747	1270
2	1303	1193	1275
3	1195	1823	1387
4	1238	1920	1716
5	974	1556	1561
6	962	1300	1260
7	1418	1952	1942
8	1405	1673	2008
9	1384	2427	2765
10	1577	2191	1833
11	1575	1984	4561
12	2028	1871	1576
13	1098	1136	1324
14	2823	3017	1707
15	1765	2454	2145
16	1517	2543	1812
17	1973	1785	1749
18	1135	1987	1866
19	2044	1750	1355
20	1955	2790	3541
21	1044	1666	1800
22	1374	1429	2481
23	1387	1840	1252
24	1113	1434	855
25	935	1340	1162
26	921	1143	944
27	1175	1782	1317
28	981	1446	848

...continuação..

29	1396	1720	1396
30	1296	1719	1900
31	1147	1614	1590
32	890	1577	1321
36	1464	2150	1498
37	1248	1764	1358
38	1061	1612	1218
39	1312	1266	1333
40	1216	1658	1462
41	1284	1665	1431
42	1213	1377	1576
43	901	1004	1591
44	349	1252	992
45	1308	1443	1432
46	1034	1961	1180
47	1319	582	1155
48	845	1182	485
49	1434	1694	1247
50	1338	1289	1788
51	1346	1903	1583
52	800	1020	1104
53	985	1295	1443
54	1095	1768	842
55	1112	1372	1062
56	1244	1410	1238
57	726	1309	1013
58	1067	1370	1182
59	1090	630	954
60	1344	1318	970
61	1388	1368	999
69	831	1817	2338
70	1425	1932	1775
71	740	1892	1092
72	1195	1911	2367
73	1084	1188	1657
74	1062	675	1341
75	859	1710	1451
76	1315	1886	1145
77	1633	851	1824
78	1823	1698	1711
79	1075	912	1443
80	989	1607	1595
99	2046	2075	1925
100	1521	1796	1471

* = valores médios (n=10) de resistência à penetração para cada profundidade.